Volks-Naturlehre

für

Schule und Haus,

mit besonderer Rücksicht auf Gewerbe, Künste und die Bedürfnisse des bürgerlichen Lebens.

Von

Ludwig Blum,

Oberreallehrer, Hauptlehrer an der Königl. Realanstalt und Lehrer der Physik und Chemie an der gewerblichen Fortbildungsschule in Stuttgart.

Drittes Buch:

Mechanik flüssiger und luftförmiger Körper.

Mit 108 Holzschnitten.

Stuttgart.

Verlag von J. B. Müller.

1855.

Druck von Blum und Vogel in Stuttgart.

Inhalts-Verzeichniß.



Mechanik flüssiger und luftförmiger Körper.

Erster Abschnitt:

Hydrostatik

oder

Lehre vom Gleichgewicht flüssiger Körper.

Obgleich im Allgemeinen die Gesetze der Mechanik auf Alles, was Materie heißt, anwendbar sind, so ergeben sich dennoch im Einzelnen Unterschiede, welche durch die besondere Beschaffenheit der Körper, vorzugsweise durch die Art ihres innern Zusammenhangs, bedingt sind. Am auffallendsten treten diese Unterschiede im mechanischen Verhalten bei den drei Hauptgruppen derselben hervor, nämlich bei den festen, flüssigen und luftförmigen Körpern. Wenn wir nun im Folgenden die mechanischen Erscheinungen der beiden letzten Gruppen, und zunächst der flüssigen Körper untersuchen wollen, so müssen wir vor Allem diejenigen Eigenschaften derselben in's Auge fassen, welche dabei von wesentlichem Einfluß sind.

Was in dieser Beziehung die flüssigen Körper gegenüber den festen zunächst kennzeichnet, ist die leichte Verschiebbarkeit ihrer Moleküle oder kleinsten Theilchen. Die Cohäsion wirkt nämlich in den Flüssigkeiten

so schwach, daß die geringste Kraft hinreicht, ihre Massentheilchen zu trennen, zu verschieben und zwischen einander zu bewegen.

Eine weitere Eigenschaft, welche hier in Betracht kommt und wodurch sich die flüssigen Körper namentlich vor den luftförmigen auszeichnen, besteht darin, daß sie selbst durch einen sehr starken Druck nur eine außerordentlich geringe Verminderung ihres Volumens erleiden, weßwegen sie in den meisten Fällen als unzusammendrückbar angesehen werden können. Das Wasser in einem See z. B., welches sich 300 Fuß unter der Oberfläche befindet, wird durch das Gewicht der darauf ruhenden Wassermasse um weniger als $^1/_{2000}$ seines Volumens zusammengedrückt, und in Folge dessen wird seine Dichte nur um diesen Bruchtheil vermehrt.

Denken wir uns, um eine genauere Vorstellung von dieser Volumens-Verminderung zu erhalten, in eine sehr hohe Röhre, deren Querschnitt im Lichten einen Quadratfuß beträgt, einen Kubikfuß Wasser gegossen, so nimmt dieser in derselben eine Höhe von einem Fuß ein. Gießen wir nun in die Röhre so lange Wasser ein, bis es 300 Fuß hoch über dem zuerst eingegossenen steht, so wird der unterste Kubikfuß Wasser durch die darüber stehende Säule, deren Gewicht — den Kubikfuß Wasser zu 70 Par. Pfd. gerechnet — 210 Cntr. beträgt, um nicht ganz $^1/_{2000}$ Kub.Fuß oder $^1/_2$ Kub.Zoll zusammengedrückt. Dies macht, bei einem Querschnitt von 1 Quadratfuß oder 100 Quadratzoll, in der Höhe nur eine Verminderung von $^1/_{200}$ Zoll ($100 \cdot {}^1/_{200}\,c'' = {}^1/_2\,c''$) oder $^1/_{20}$ Linie aus.

Hört der auf Flüssigkeiten ausgeübte Druck auf, so dehnen sie sich wieder zu ihren ursprünglichen Volumen aus, ein Beweis, daß die flüssigen Körper auch elastisch sind.

Endlich sind es die vereinigten Wirkungen der Cohäsions-, der Adhäsions- und der Schwerkraft, die bei den Flüssigkeiten Verhältnisse bedingen, welche bei der Untersuchung ihres mechanischen Verhaltens nicht übersehen werden dürfen.

Fortpflanzung des Drucks in den Flüssigkeiten.

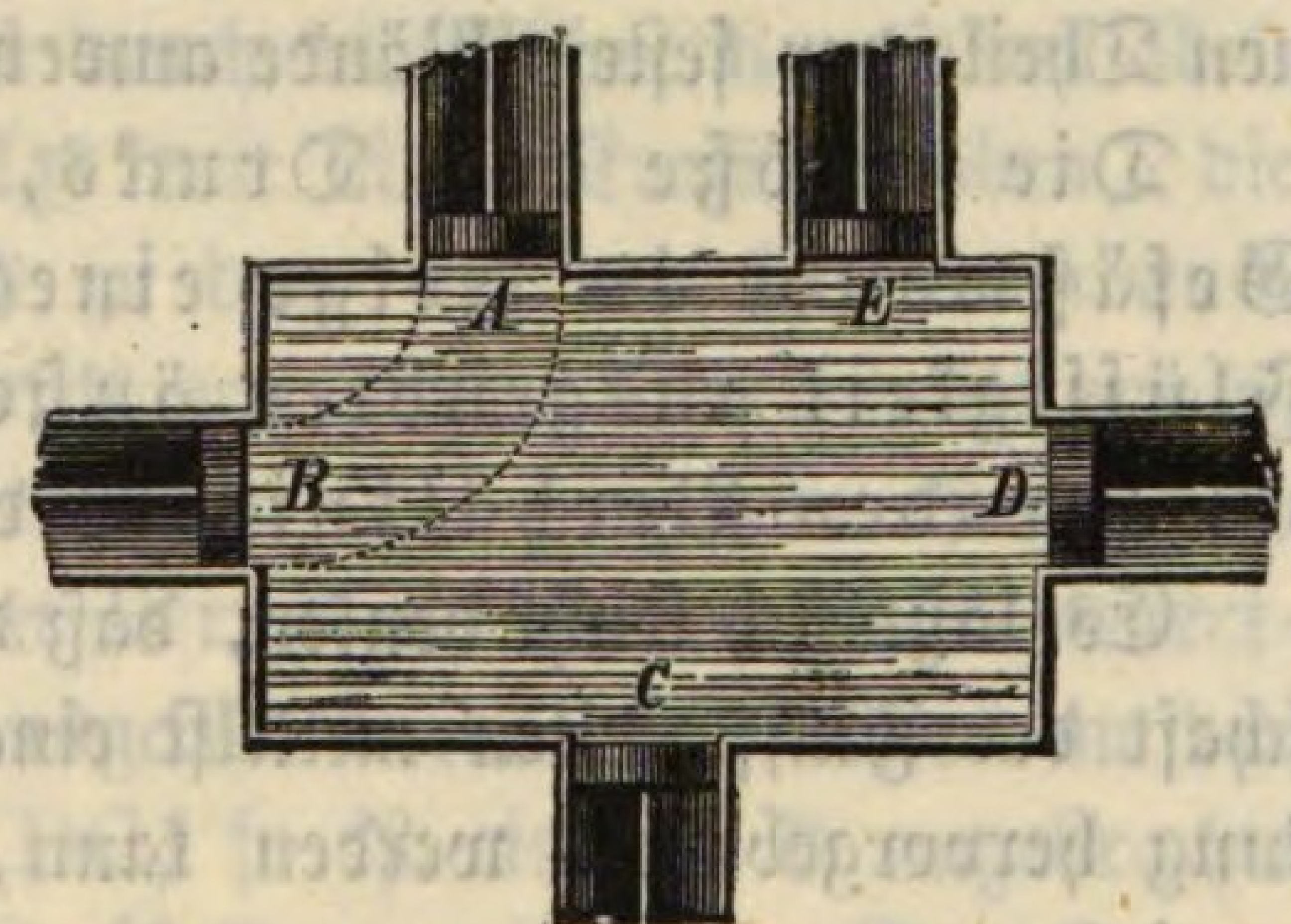
Wenn wir vermittelst eines Eisenstabs auf einen Theil der Oberfläche eines Stücks Blei einen hinlänglich starken Druck ausüben, so rücken die zunächst unter dem Stab befindlichen Bleitheilchen näher zusammen, was an der dadurch entstehenden Vertiefung zu erkennen ist; entfernter liegende Theilchen des Bleiklotzes leiden unter jenem Drucke nicht. Bauen wir aus lauter gleichen Würfelchen mehrere Säulen auf und rücken dieselben zu einer einzigen größern Säule zusammen, so pflanzt sich der Druck, der auf ein an der Oberfläche befindliches Würfelchen etwa von oben nach unten ausgeübt wird, nur auf die in der Richtung des Drucks darunter liegenden Würfelchen fort; auf die ringsum daneben befindlichen erstreckt

sich der Druck nicht. Anders verhält es sich, wenn wir auf Schrotkörner oder Erbsen, die in einem Gefäß enthalten sind, drücken: diese weichen, da ihre runde Gestalt eine solche Verschiebung zuläßt, nach allen Seiten aus, wenn das Gefäß offen ist, oder sie äußern durch eine Pressung auf die Wände des Gefässes wenigstens das Bestreben auszuweichen, wenn dieses voll und verschlossen ist.

In einem unvergleichlich höhern Grade kommt die Eigenschaft der Verschiebbarkeit den Massentheilchen der flüssigen Körper zu, weßhalb bei diesen auch eine weit vollkommenere Verbreitung des auf sie ausgeübten Druckes stattfindet, und man ist durch die in dieser Beziehung gemachten Erfahrungen zu dem Schlusse gelangt:

Ein auf irgend einen Theil einer Flüssigkeit ausgeübter Druck pflanzt sich in unveränderter Stärke nach allen Richtungen durch die ganze Masse fort.

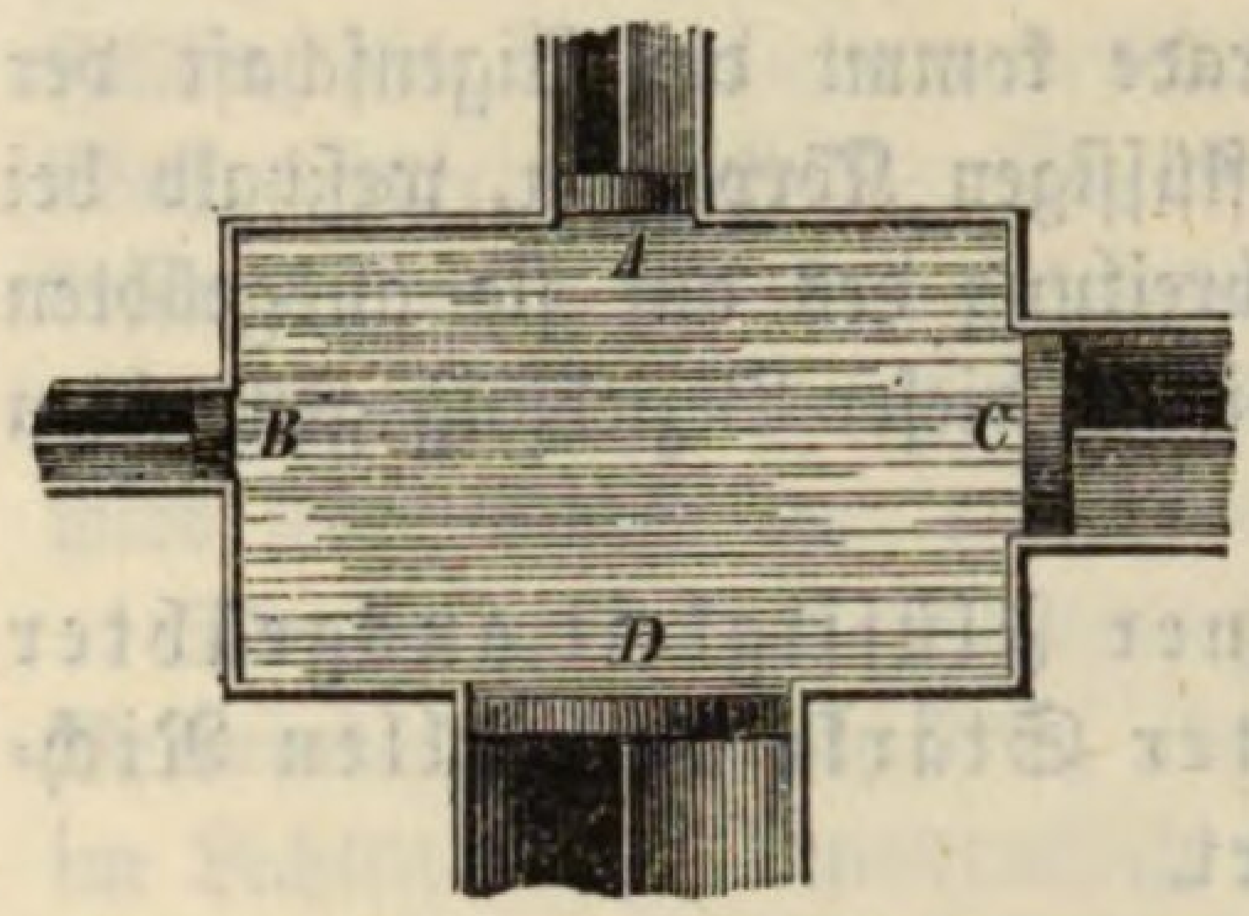
Haben wir z. B. ein mit Wasser *) gefülltes Gefäß, in dessen Wänden röhrenförmige, durch Kolben verschlossene Ansätze A, B, C, D, E von gleichem Querschnitt angebracht sind, so verbreitet sich der auf einen dieser Kolben ausgeübte Druck mit gleicher Stärke durch das ganze Gefäß, und wird daher auch auf die Wände des Gefässes und die übrigen Kolben übergetragen. Beschweren wir also z. B. den Kolben A mit einem Gewicht von 10 Pfd., so muß jeder der übrigen Kolben, gleichgültig, an welchem Theil der Wände derselbe angebracht ist, durch einen Gegendruck von 10 Pfd. festgehalten werden, wenn das Gleichgewicht fortbestehen soll **). Denn, denken wir uns z. B. die Wände der Röhre B in der Flüssigkeit bis zu der Röhre A fortgesetzt, was offenbar keine Aenderung im Gleichgewichtszustand des Ganzen bedingen kann, so ist klar, daß die an den beiden Enden der Röhre angebrachten Kolben A und B nur dann im Gleichgewicht sein können, wenn sie auf die zwischen ihnen befindliche Wassersäule, die als unzusammendrückbar betrachtet werden kann, mit gleicher Stärke drücken. Was hier von dem Kolben B gesagt worden ist, gilt auch für C, D und E.



*) Wasser nehmen wir in den folgenden Betrachtungen häufig gleichbedeutend mit Flüssigkeiten im Allgemeinen.

**) Hier ist vor der Hand das Gewicht des Wassers selbst nicht in Betracht gezogen.

Sollen zwei solcher Kolben zugleich von einer Kraft im Gleichgewicht erhalten werden, so muß diese einen doppelten Druck ausüben; dieselbe Größe muß die Kraft auch noch dann haben, wenn die zwei gleichen Kolben durch einen einzigen vom doppelten Querschnitt ersetzt werden. Hieraus geht hervor, daß, wenn der Kolben A des hier abgebildeten Gefässes, wie oben, mit 10 Pfd. belastet ist, der Kolben C vom doppelten Querschnitt mit einer Kraft von 20 Pfd., und der Kolben B vom halben Querschnitt mit einer Kraft von 5 Pfd. gegen die Flüssigkeit gedrückt werden müssen, wenn sie nicht von dieser zurückgetrieben werden sollen. Allgemein: es muß sich für den Fall des Gleichgewichts der Druck auf einen Kolben A zum Druck auf einen Kolben D verhalten, wie der Querschnitt von A zum Querschnitt von D. — Was für die Kolben gilt, ist auch auf die einzelnen Theile der festen Wände anwendbar; daher stellen wir das Gesetz auf:

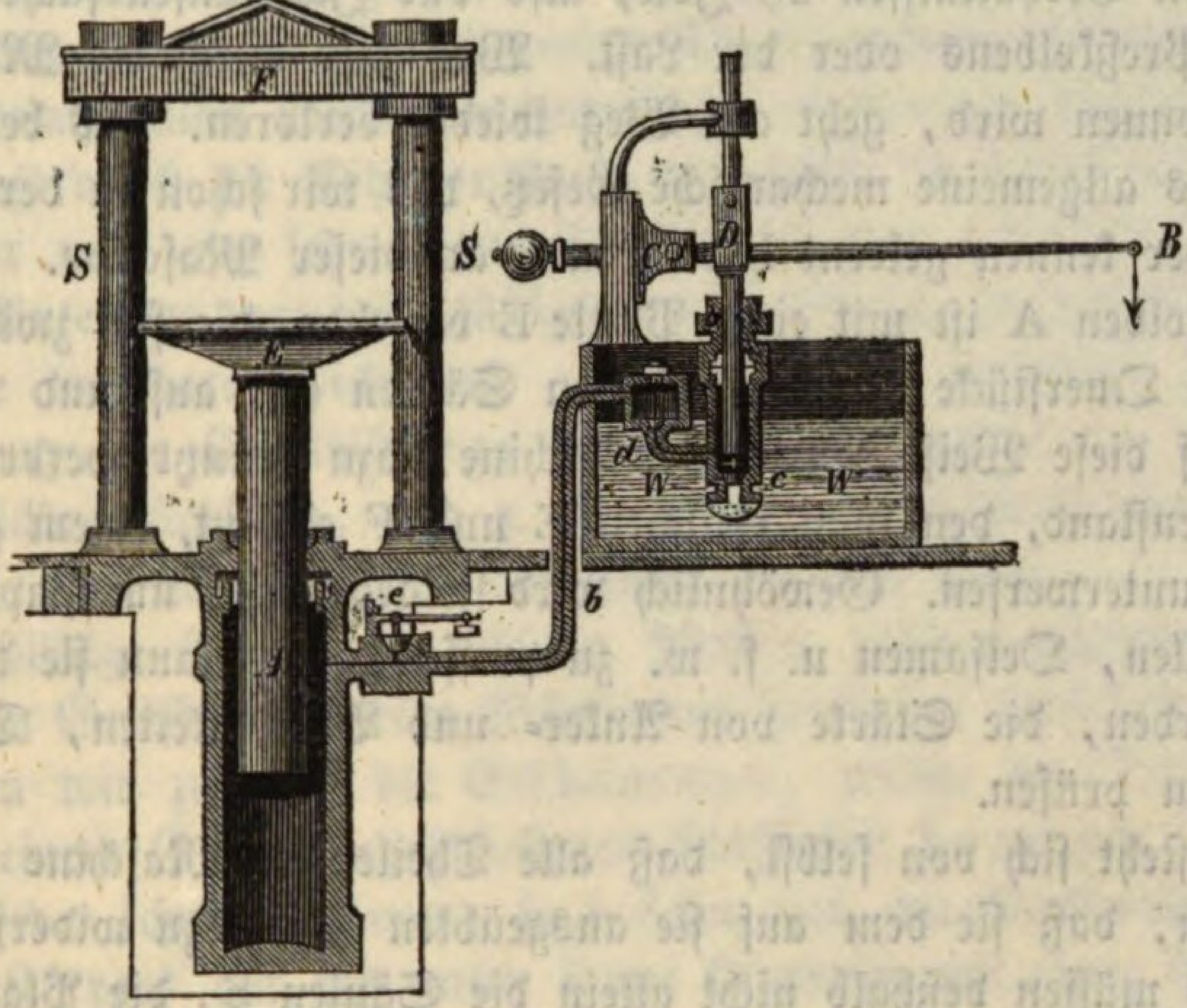


Die Größe des Drucks, dem die einzelnen Theile der Gefäßwände in Folge eines auf die im Gefäß enthaltene Flüssigkeit ausgeübten äußern Druckes ausgesetzt sind, steht im geraden Verhältniß zu dem Flächeninhalt dieser Theile.

Es läßt sich leicht denken, daß durch Benutzung dieser besondern Eigenschaft der Flüssigkeiten mittelst einer geringen Kraft eine bedeutende Wirkung hervorgebracht werden kann, wie an dem hier folgenden Beispiel gezeigt werden soll.

Die **hydraulische** oder **Bramah'sche Presse** besteht in der Hauptsache aus zwei Kolben, einem kleinen (a), dem Druckkolben, und einem großen (A), dem Preßkolben. Beide Kolben bewegen sich unter wasserdichtem Verschluß in cylinderförmigen Wasserbehältern, welche durch ein Röhrenstück b mit einander in Verbindung stehen. Der Kolben a wird durch den einarmigen Hebel BC um den Drehungspunkt C auf und nieder bewegt; am längern Arm BC wirkt die Kraft, und am kleinern Arm DC ist der Kolben a eingehängt. Bei c ist ein Ventil angebracht, welches beim Heben des Kolbens a dem im Gefäß W befindlichen Wasser den Eintritt in den Behälter dieses Kolbens gestattet, beim Niedergehen desselben aber den Rücktritt des Wassers verhindert. Ein zweites Ventil d schließt die Verbindung der Röhre b mit dem Wasserbehälter des Druckkolbens ab, sobald dieser sich hebt, und öffnet den Durchgang, wenn er sich senkt.

Die Behälter und die Verbindungsröhre seien mit Wasser gefüllt.



Wird nun der Kolben a niedergedrückt, so pflanzt sich, da das Wasser nirgends frei austreten kann, der Druck durch die Röhre b auf den Kolben A fort, und dieser wird demzufolge mit einer Kraft gehoben, die nach dem zuletzt aufgestellten Gesetz sich zu dem auf den Kolben a ausgeübten Druck verhält, wie der Querschnitt von A zum Querschnitt von a. Hat z. B. der große Kolben einen Querschnitt von 1 Quadratfuß, und der kleine von 1/2 Quadratzoll, so ist der Druck auf A das Zweihundertfache von demjenigen, welcher auf a ausgeübt wird. Ist außerdem der Hebelarm BC etwa das Zehnfache von DC, so ist eine in B angebrachte Kraft von 30 Pfd. im Stande, den Preßkolben mit einer Gewalt von 10 . 30 . 200 = 60000 Pfd. oder 600 Cntr. in die Höhe zu treiben. Die Last beträgt also in diesem Fall das Zweitausendfache der Kraft.

Durch einen Niedergang des Kolbens a wird eine verhältnißmäßig sehr geringe Menge Wasser durch die Röhre b in den Behälter des Kolbens A gepreßt, welche sofort durch Nachströmen aus W ersetzt wird, wenn der Kolben a wieder in die Höhe geht; es bedarf daher einer ziemlich beträchtlichen Zahl von Druckkolbenhüben — eine Hebung und eine Senkung bilden zusammen einen Hub —, um den Preßkolben um ein merkliches Stück zu erheben. Da nämlich in unserm Beispiel der Querschnitt des Druckkolbens nur den 200. Theil von dem des Preßkolbens beträgt, so bewirkt die einem Hub des Druckkolbens entsprechende Wassermasse eine Erhebung des Preßkolbens, die auch nur den 200. Theil von der Höhe des Druckkolbenhubs ausmacht. Beträgt also diese z. B. 2 Zoll, so steigt mit jedem Hub des Druckkolbens der Preßkolben um 1/100 Zoll oder 1/10 Linie. Der Weg des Angriffspunktes B der Kraft ist bei den an-

genommenen Verhältnissen 20 Zoll, also das Zweitausendfache von dem Weg des Preßkolbens oder der Last. Was also durch die Maschine an Kraft gewonnen wird, geht am Weg wieder verloren. Es bestätigt sich somit dieses allgemeine mechanische Gesetz, das wir schon in der Mechanik fester Körper kennen gelernt haben, auch an dieser Maschine.

Der Kolben A ist mit einer Platte E versehen, die sich zwischen vier, oben durch Querstücke (F) verbundenen Säulen (S) auf und nieder bewegt. Auf diese Weise kann die Maschine dazu benutzt werden, irgend einen Gegenstand, den man zwischen E und F einsetzt, einem gewaltigen Druck zu unterwerfen. Gewöhnlich wird sie gebraucht, um Papier, Tuch, Waarenballen, Oelsamen u. s. w. zu pressen; auch kann sie dazu angewendet werden, die Stärke von Anker- und Brückenketten, Drahtseilen u. dergl. zu prüfen.

Es versteht sich von selbst, daß alle Theile der Maschine so gebaut sein müssen, daß sie dem auf sie ausgeübten Druck zu widerstehen vermögen; es müssen deßhalb nicht allein die Säulen S, die Platte E und die Querstücke F, sondern auch die Wände der Behälter und der Verbindungsröhre — letztere ist gewöhnlich aus Kupfer, die übrigen Stücke aus Eisen — eine bedeutende Stärke erhalten. An der Röhre b ist ein Sicherheits-Ventil (e) angebracht, dessen Belastung (ein an einem kleinen, einarmigen Hebel angehängtes Gewicht) so bemessen ist, daß das Ventil sich öffnet und dem Wasser den Austritt gestattet, sobald sich der Druck desselben zu einer für die Maschine gefahrdrohenden Höhe steigert.

Gestalt der freien Oberfläche flüssiger Körper.

Wenn in einem flüssigen Körper die Cohäsionskraft allein thätig wäre, so würden sich die einzelnen Moleküle desselben gleichförmig an und um einander lagern, d. h. der Körper würde eine kugelförmige Gestalt annehmen, wie dieß auch wirklich geschieht, wenn ganz kleine Mengen desselben, auf welche die Schwerkraft einen nur unbedeutenden Einfluß ausüben kann, entweder frei in der Luft schweben, z. B. Regentropfen, oder mit einem Körper in Berührung stehen, bei dem die Adhäsion sehr schwach wirkt, z. B. Quecksilberkügelchen auf einer Glastafel, Wasserkügelchen auf einer bestaubten Fläche.

Wirkt jedoch im zweiten Fall zugleich die Adhäsion, und zwar stärker als die Cohäsion, so gibt der flüssige Körper die Kugelform auf und nimmt, indem seine Moleküle von dem fremden Körper angezogen werden, die Gestalt der berührten oder benetzten Oberfläche an, wie z. B. ein Regentropfen, der auf ein Blatt fällt oder sich an eine Fensterscheibe hängt, oder ein Quecksilberkügelchen, das von einer Glastafel auf eine Zinnplatte rollt.

Auch die Schwerkraft zwingt die Flüssigkeiten, sich auf ihrer Unterlage auszubreiten, indem die tiefer liegenden Theilchen durch die Last der darauf ruhenden nach allen Seiten auszuweichen gezwungen werden. Ist die Schwerkraft durch die Adhäsionskraft unterstützt, so bildet die Flüssigkeit zuletzt nur noch eine sehr dünne Schicht; ist dies nicht der Fall, d. h. wird die Unterlage von der Flüssigkeit nicht benetzt, so behält diese immer noch eine merkbare Dicke und zeigt in ihrem gewölbten Rand noch die Neigung zur Kugelbildung; kleinere Massen erscheinen alsdann als breitgedrückte Kügelchen, wie z. B. große Quecksilbertropfen auf einer Glastafel, oder Wassertropfen auf einem polirten Tisch.

Um flüssige Körper in größern Massen zusammenzuhalten, schließt man sie in Gefässe ein, deren Wände das Zerfließen derselben verhindern. Betrachten wir zunächst die Erscheinungen, welche die Schwerkraft an einer in einem Gefäß eingeschlossenen Flüssigkeit hervorruft.

Wie jeder schwere Körper, so drücken auch die Massentheilchen eines flüssigen Körpers auf die unter ihnen liegenden mit einer Stärke gleich ihrem Gewicht. Dieser Druck pflanzt sich nach der schon berührten besondern Eigenschaft der flüssigen Körper in gleicher Stärke nicht allein von oben nach unten, sondern auch seitwärts und aufwärts nach allen Richtungen fort, und ist dadurch von wesentlichem Einfluß auf die Gestalt und Lage der freien Oberfläche der Flüssigkeit.

Ein an der Oberfläche befindliches Theilchen drückt mit seinem Gewicht auf das zunächst darunter liegende; dieses pflanzt den erhaltenen Druck auf das dritte fort und vermehrt denselben um sein eigenes Gewicht; das dritte drückt auf das vierte, indem es dem von den beiden darüberliegenden Theilchen erhaltenen Druck sein Gewicht hinzufügt u. s. f. Hieraus geht der Satz hervor:

Jedes unter der Oberfläche befindliche Theilchen eines flüssigen Körpers steht in Folge der Schwere unter einem Druck gleich dem Gewicht der senkrecht darüber stehenden Flüssigkeitssäule.

Aus diesem Satz geht unmittelbar die weitere Folgerung hervor:

Die freie Oberfläche eines in einem Gefäß enthaltenen und in Ruhe befindlichen flüssigen Körpers bildet eine horizontale Ebene.

Denn wäre die Oberfläche der Flüssigkeit uneben oder geneigt, so wären die einander zunächst liegenden Theilchen im Innern der Flüssigkeit von verschiedenen Seiten her einem ungleich großen Druck ausgesetzt, und könnten folglich nicht im Gleichgewicht sein. — Die Oberfläche des flüssigen Körpers habe z. B. die in umstehender Zeichnung angedeutete Gestalt. Betrachten wir nun eine horizontale Schicht mn im Innern



der Flüssigkeit, so springt von selbst in die Augen, daß ein Theilchen s, das auf der einen Seite von dem Gewicht der Säule or und auf der andern von dem geringeren Gewicht der kleinern Säule uv gedrückt wird, gezwungen ist, dem größern Druck zu weichen, das Flüssigkeitstheilchen u auf die Seite zu schieben und dem Theilchen o den Platz zu räumen. Die Folge hiervon ist, daß die höheren Flüssigkeitssäulen herabsinken, und die niedrigeren durch das Zuströmen der verdrängten Flüssigkeit sich heben, und daß die ganze Masse erst dann zur Ruhe kommt, wenn über allen in einer horizontalen Schicht gelegenen Theilchen des flüssigen Körpers gleich hohe Säulen stehen, oder, mit andern Worten, wenn dem oben ausgesprochenen Gesetze Genüge geleistet ist. — Die ruhige Oberfläche einer Flüssigkeit heißt ihr Spiegel oder ihr Niveau.

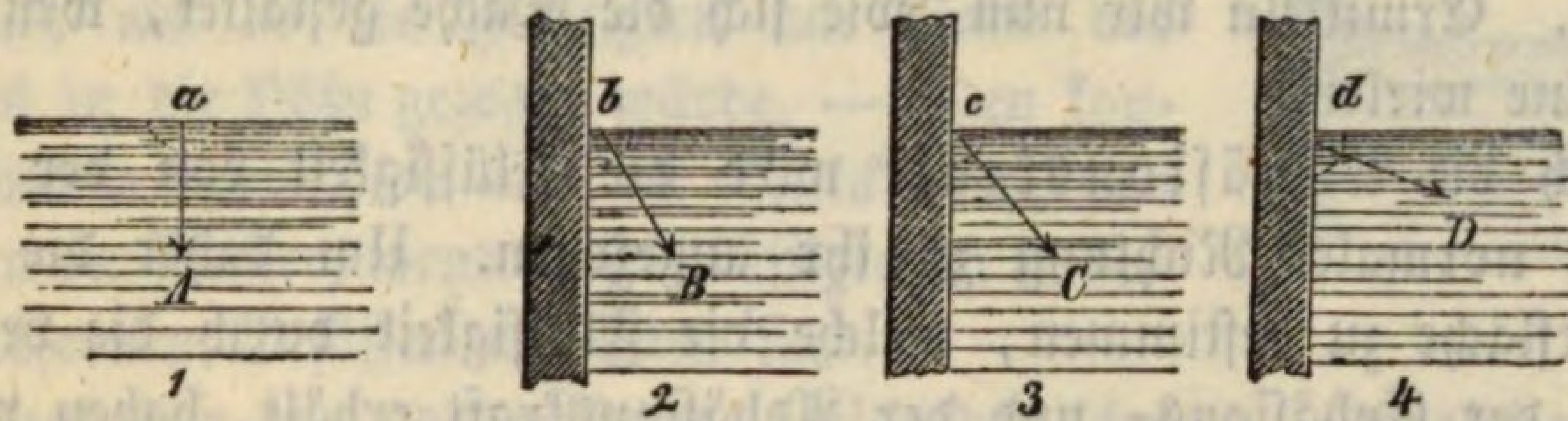
Der hier bewiesene Satz ist jedoch nur auf Oberflächen von nicht allzugroßer Ausdehnung anwendbar, d. h. auf solche, für welche die Richtung der Schwerkraft (gegen den Mittelpunkt der Erde) ohne merklichen Fehler in allen Punkten als parallel und eben deßwegen auch die darauf senkrecht oder normal stehenden Flächenelemente als in einer und derselben Ebene liegend betrachtet werden können; wie auch kleinere Strecken der gekrümmten Erdoberfläche nur soweit eben erscheinen, als die genannte Annahme auf sie anwendbar ist. Ausgedehntere Wasserspiegel, wie die der Meere und großer Seen, erscheinen nicht mehr als Ebenen; vielmehr tritt bei ihnen die runde Gestalt der Erdoberfläche, von der sie beträchtlichere Theile ausmachen, augenscheinlich hervor.

Eine weitere Beschränkung des obigen Satzes bezieht sich auf Flüssigkeiten, die in Gefäßen eingeschlossen sind: durch das Zusammenwirken der Cohäsionskraft und der Adhäsionskraft erleidet nämlich der Spiegel solcher Flüssigkeiten in der Nähe der Gefäßwände gewöhnlich in der Weise eine Abänderung, daß er sich entweder abwärts krümmt und eine Vertiefung bildet, oder daß er sich an den Wänden gleichsam hinaufzieht und über das übrige Niveau erhebt. — Gehen wir auf eine nähere Untersuchung dieser Erscheinungen ein.

Der Satz über den Spiegel einer ruhigen Flüssigkeit läßt sich leicht in allgemeinerer Form darthun, indem man statt der senkrechten Schwerkraft eine beliebig gerichtete Kraft, die auf irgend einen Theil der Flüssigkeitsoberfläche wirkt, in die Betrachtung aufnimmt. Auf diese Weise erhält man den verallgemeinerten Satz:

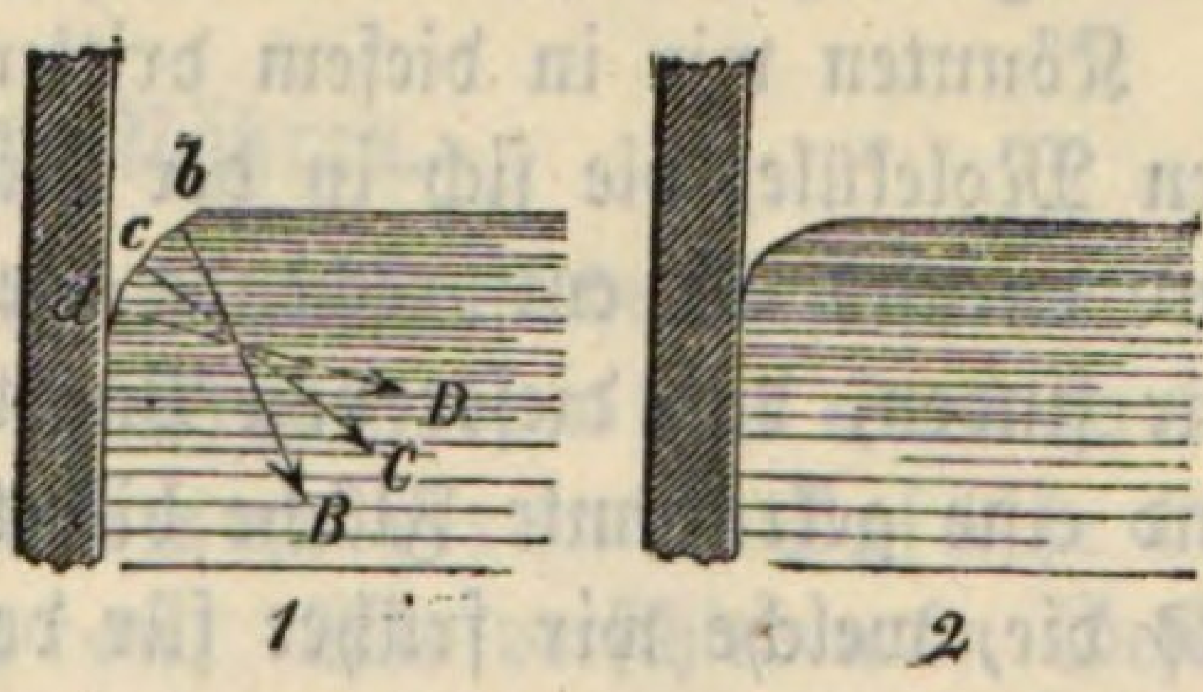
Wenn auf die an der Oberfläche befindlichen Massentheilchen eines flüssigen Körpers irgend eine Kraft wirkt,

so nimmt die Oberfläche im Zustand des Gleichgewichts eine zur Richtung dieser Kraft normale Lage an.



Die Cohäsionskraft bringt keine Aenderung im Gleichgewichtszustand eines an der freien Oberfläche gelegenen Theilchens a (1 der vorstehenden Zeichnung) hervor, wenn die auf dasselbe wirkenden Nachbartheilchen an der Oberfläche und unterhalb derselben so gleichförmig vertheilt sind (der punktirte Halbkreis bezeichne in vergrößertem Maßstab die Grenze der Flüssigkeitstheilchen, welche durch Cohäsion auf a wirken), daß die Mittelkraft A ihrer kleinen Anziehungen senkrecht abwärts, also normal zu der horizontalen Oberfläche gerichtet ist.

Anders verhält es sich bei denjenigen Massentheilchen, die sehr nahe an der Gefäßwand liegen. Diese werden, sobald ihre Entfernung von der Wand geringer ist, als die Weite, auf welche sich die Wirkung der Cohäsionskraft erstreckt, wie bei b in 2, von dieser nicht senkrecht abwärts gezogen, sondern in einer schiefen Richtung b B, nämlich in der Richtung der Mittelkraft B aller der kleinen Cohäsionskräfte, welche von den zu beiden Seiten ungleich vertheilten Molekülen ausgehen. — Berührt ein Flüssigkeitstheilchen die Wand unmittelbar, wie c in 3, so halbirt die Richtung der Resultante C den Winkel, den die horizontale Oberfläche der Flüssigkeit mit der Gefäßwand in jenem Punkt macht. — Liegt endlich ein Molekül um weniger, als die Wirkungsweite der Cohäsion beträgt, unter der Oberfläche und unmittelbar an der Wand, wie d in 4, so ist die Richtung der Resultante D noch weiter von der senkrechten abgelenkt.

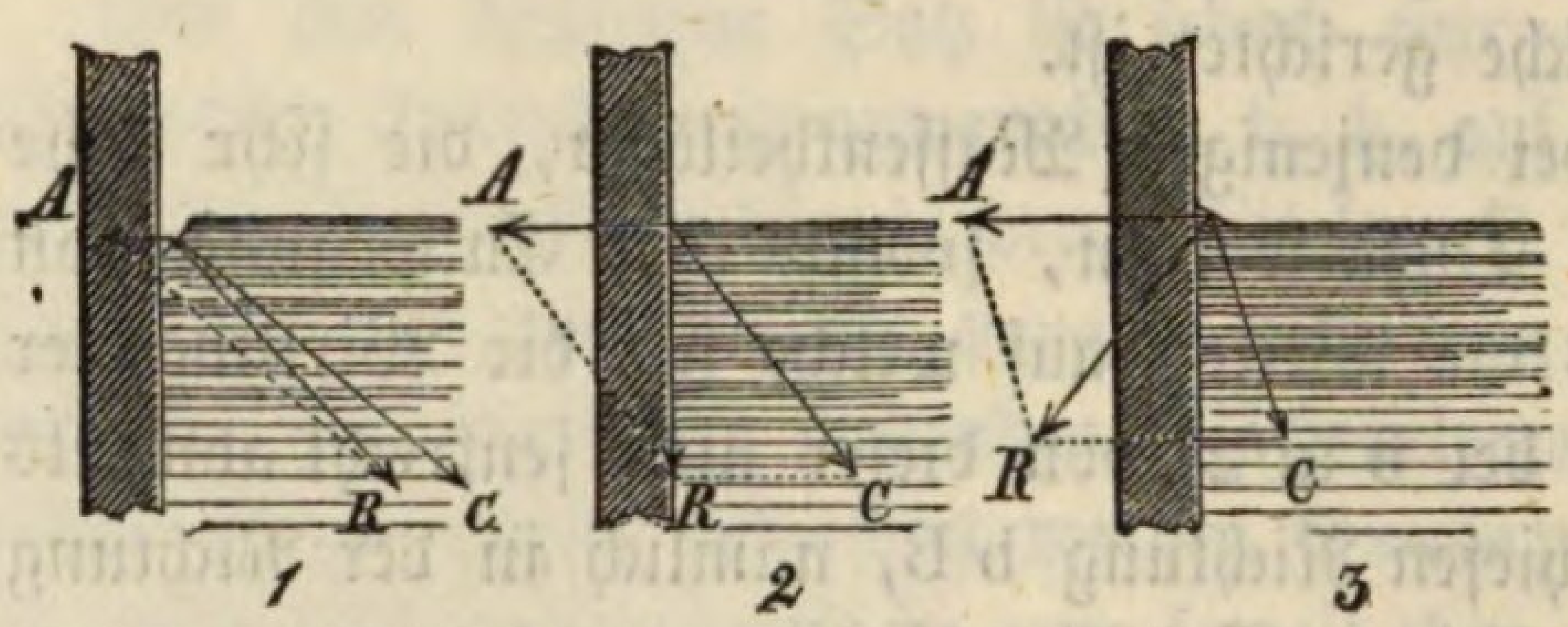


Dem obigen Gesetz zufolge müßte nun die Oberfläche in der Nähe der Wand die in 1 der nebenstehenden Zeichnung angegebene Gestalt annehmen. Wenn wir aber, statt der drei entfernt von einander liegenden Moleküle b, c und d, alle zwischen b und d liegenden Theilchen der Reihe nach betrachten könnten, so würde sich ergeben, daß, wie die aufeinanderfolgenden Resultanten, so auch die Oberfläche selbst von Punkt zu Punkt ihre Richtung wechselt, d. h. daß sie eine gekrümmte, nach außen konvexe Gestalt annimmt, wie dieß in 2 angegeben ist.

Bisher haben wir die Adhäsion zwischen Wand und Flüssigkeit ganz aus dem Spiele gelassen, und die Wirkung der Cohäsion für sich allein betrachtet. Ermitteln wir nun, wie sich die Sache gestaltet, wenn beide im Vereine wirken.

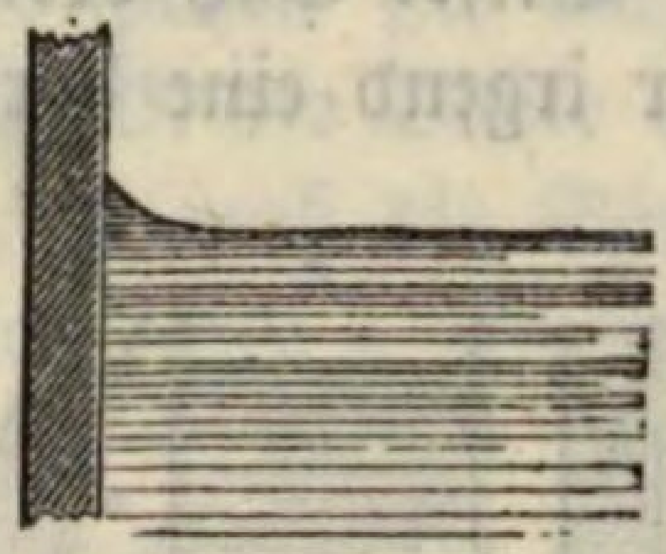
Durch die Adhäsionskraft wird die Flüssigkeit von der Gefäßwand in normaler Richtung zu ihr angezogen. Um daher die Gestalt der Oberfläche zu bestimmen, welche die Flüssigkeit durch die vereinigte Wirkung der Cohäsions- und der Adhäsionskraft erhält, haben wir nur die kleinen Adhäsionskräfte, welche auf die einzelnen Moleküle wirken, mit den entsprechenden Cohäsionskräften, wie wir sie oben gefunden haben, zusammenzusetzen, und das betreffende Flächenelement des Spiegels normal zu der aus beiden sich ergebenden Mittelkraft zu stellen.

Ist die Adhäsionskraft A, wie in 1 unserer Zeichnung angenommen ist, im Vergleich zur Cohäsionskraft C sehr unbedeutend, so ist die Resultante R nach Richtung und Größe nur unmerklich von der Cohäsionskraft verschieden, und eben deßhalb weicht auch die Gestalt der Oberfläche nur wenig von derjenigen ab, welche die Flüssigkeit durch die alleinige Wirkung der Cohäsion erhalten würde. — Wirkt dagegen die Adhäsion so stark, daß sie, wie in 2, eine vertikal abwärts gerichtete Resultante bedingt, so behält die Oberfläche der Flüssigkeit in der Nähe der Gefäßwand ihre horizontale Lage, weil nun die Richtung jener Resultante mit der Richtung der Schwerkraft zusammenfällt. — Ist endlich die Wirkung der Adhäsionskraft von der Art, daß sie mit der Cohäsionskraft eine nach außen gerichtete Resultante gibt, so nimmt das betreffende Element der Oberfläche die Lage an, wie sie in der 3. Figur angegeben ist.



Könnten wir in diesem dritten Fall die Resultanten für alle einzelnen Moleküle, die sich in der Nähe der Gefäßwand befinden, bestimmen und daraus die entsprechende Gestalt des Spiegels ableiten, so müßten wir finden, daß dieser von Punkt zu Punkt eine andere Richtung annimmt und eine gekrümmte Fläche bildet. Die Krümmung ist aber eine andere, als die, welche wir früher für den Fall gefunden haben, daß die Cohäsion allein wirkt, und welche auch dann noch sich bilden wird, wenn, wie im ersten der drei soeben besprochenen Fälle angenommen wurde, die Adhäsion so unbedeutend ist, daß die Resultante beider in Richtung und Größe nur wenig von der Cohäsionskraft abweicht. Während dort der Spiegel eine convexe Gestalt annimmt, so daß es den Anschein hat, als werde

die Flüssigkeit von der Gefäßwand zurückgestoßen, bildet er hier eine konkave Fläche, und macht den Eindruck, als ob die Flüssigkeit am Rand des Gefässes in die Höhe gezogen würde. — Den konvexen Rand beobachten wir an Quecksilber, den konkaven an Wasser, wenn diese Flüssigkeiten in reinen, gläsernen Gefässen enthalten sind.



Bringt man zwei oder mehrere, verschieden schwere Flüssigkeiten, welche sich nicht mit einander vermischen, in ein Gefäß, so nimmt in allen gewöhnlichen Fällen die schwerste die unterste Stelle ein, und über ihr folgen sich die übrigen in der Ordnung, daß immer die schwerere unter diejenige zu stehen kommt, welche die nächst geringere Dichte hat. Haben wir z. B. die Flüssigkeiten Quecksilber, Wasser und Oel, so kommt das Quecksilber zu unterst zu stehen, dann das Wasser, und zu oberst das Oel. Dabei muß auch die Trennungsfläche je zweier zunächst über einander stehender Flüssigkeiten, d. h. die Oberfläche jeder einzelnen, im Zustand des Gleichgewichts eine horizontale Ebene bilden, wovon man sich durch eine ähnliche Betrachtung, wie die über die freie Oberfläche der flüssigen Körper im Allgemeinen, leicht überzeugen kann.

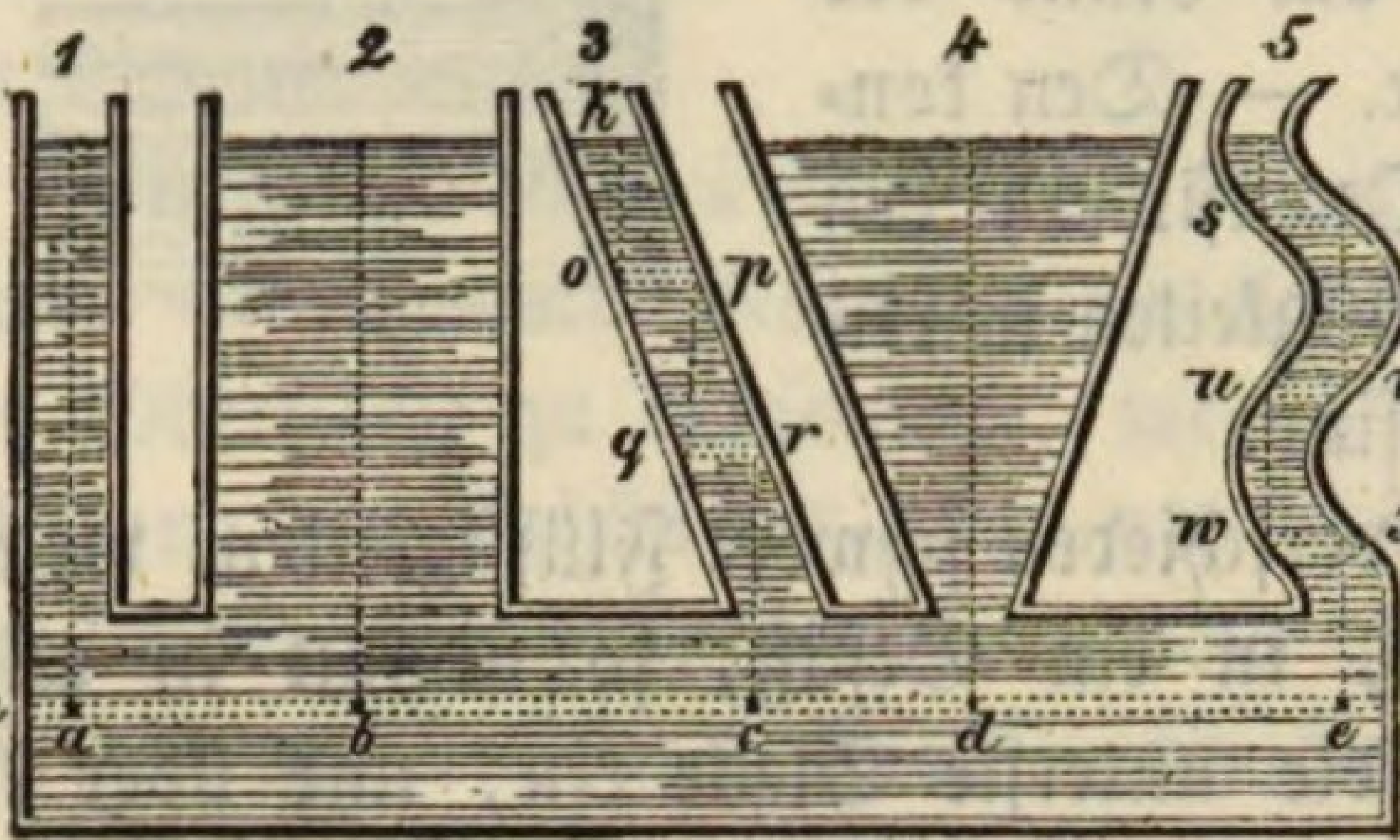
Die **Libelle** oder **Wasserwage** ist ein Instrument, das aus einer kurzen, auf beiden Seiten verschlossenen Glasröhre oder aus einem runden, dosenförmigen Gefäß besteht, das mit einem gläsernen Deckel versehen ist. Die Röhre oder das Gefäß ist bis auf einen ganz kleinen Raum, der Luft enthält, mit Wasser gefüllt, so daß auf dem Wasser eine Luftblase zu schwimmen scheint. Diese Luftblase erscheint gerade in der Mitte der gläsernen Röhre oder des kreisförmigen Deckels, wenn die Libelle genau horizontal gestellt ist, und es kann daher dieses Instrument dazu benutzt werden, zu erkennen, ob eine ebene Fläche, auf die sie gestellt wird, eine horizontale Lage hat oder nicht. Gewöhnlich wird sie bei Meßtischen, astronomischen Instrumenten u. s. w. angewendet.

Kommunizirende Röhren.

Stehen zwei oder mehrere neben einander befindliche Gefässe mit einander in solcher Verbindung, daß eine Flüssigkeit von dem einen in das andere übertreten kann, so heißen sie *kommunizirende Gefässe* oder gewöhnlicher *kommunizirende Röhren*. Wie verschieden in Gestalt und Größe solche Gefässe auch sein mögen, so gilt von ihnen das Gesetz:

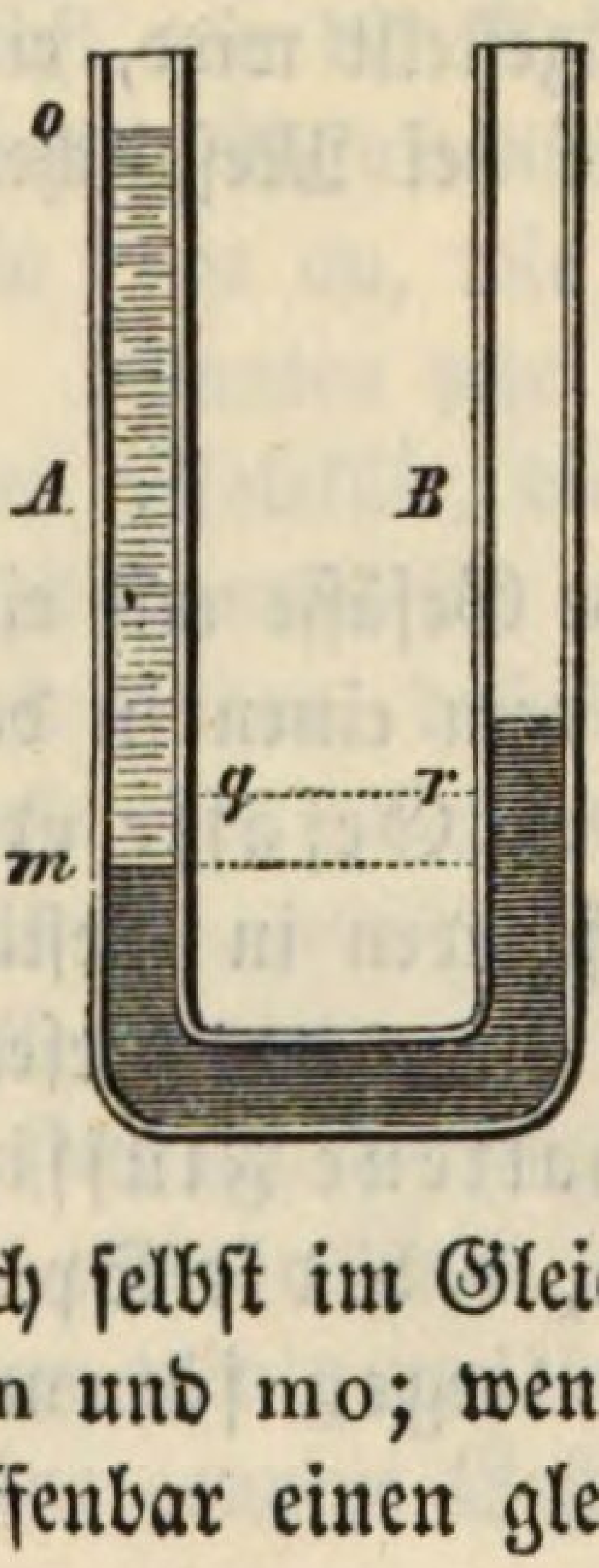
Ist eine in kommunizirenden Röhren enthaltene Flüssigkeit in Ruhe, so steht sie in diesen gleich hoch, d. h. die Spiegel der Flüssigkeit in den einzelnen Röhren liegen sämmtlich in einer und derselben Horizontalebene.

Dieser Satz bedarf kaum eines näheren Nachweises. Denn betrachten wir irgend eine horizontale Schicht mn in der Verbindungsröhre der hier abgebildeten kommunizirenden



Gefässe, so leuchtet von selbst ein, daß nach den früher aufgestellten Grundsätzen beliebige Theilchen a, b, c, d, e ꝛc. dieser Schicht nur dann im Gleichgewicht sein können, wenn die darüber stehenden Säulen in den einzelnen Gefässen gleich hoch sind. Wer bei den Gefässen 3 und 5, wo die über c und e stehenden Vertikallinien nicht bis zum Niveau reichen, wie bei 1, 2 und 4, Zweifel über die Höhe dieser Säulen hegen könnte, der erwäge nur, daß das Flüssigkeitstheilchen c unter demselben Drucke steht, wie irgend ein Theilchen der Schichte qr, vermehrt um das Gewicht einer Flüssigkeitssäule von der Höhe cr; daß ferner die Theilchen der Schicht qr einen um das Gewicht einer Flüssigkeitssäule von der Höhe qp größeren Druck erleiden, als die Theilchen der Schicht op; daß aber über dieser Schicht eine Säule von der Höhe ok steht, und daß somit endlich der Druck, dem das Theilchen c ausgesetzt ist, dem Gewicht einer Flüssigkeitssäule von der Höhe cr + qp + ok, d. h. von der ganzen Höhe des Niveau's über mn, die in allen Gefässen dieselbe ist, entspricht. Zum gleichen Ergebniß gelangt man bei der Röhre 5, wenn man die Zwischenschichten wx, uv und st zu Hülfe nimmt.

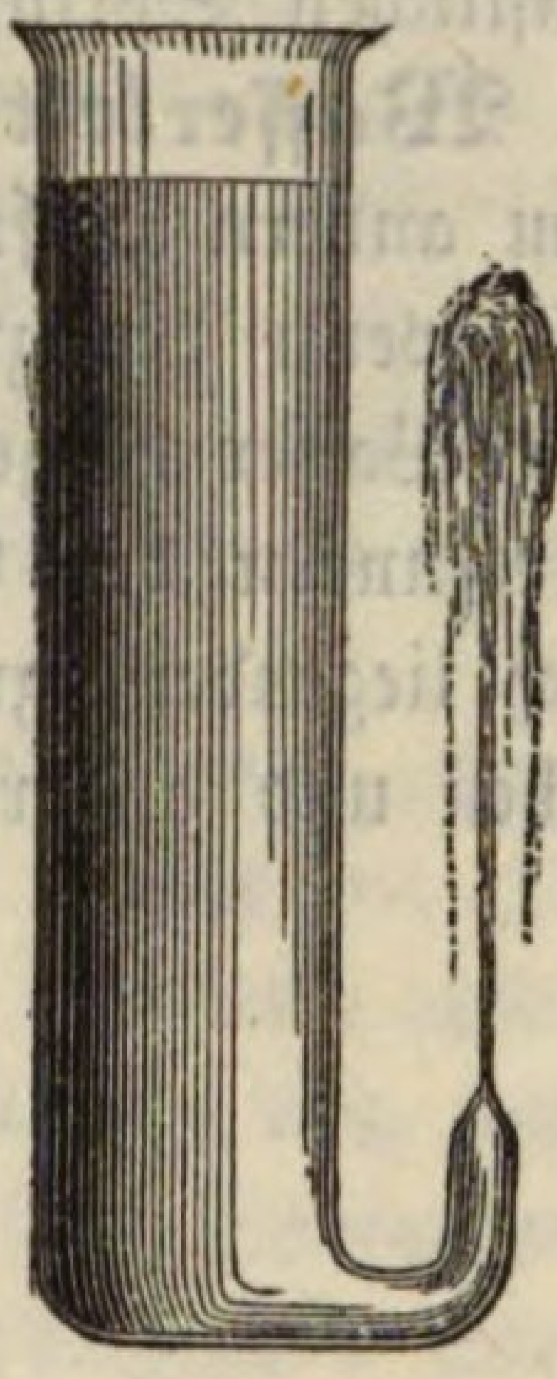
Das oben aufgestellte Gesetz erleidet eine Abänderung, wenn in kommunizirenden Röhren verschieden dichte Flüssigkeiten enthalten sind. Gießen



wir nämlich in die kommunizirenden Röhren A und B zuerst nur eine gewisse Menge der schwereren Flüssigkeit, so wird sie für sich allein in beiden Röhren gleich hoch, etwa im Niveau qr, stehen; bringen wir aber nun in die eine Röhre, z. B. in A, auch von der leichtern Flüssigkeit, so wird diese durch ihr Gewicht die schwerere so weit in die Röhre B zurückdrängen, bis das Gleichgewicht zwischen beiden wieder hergestellt ist. Wann wird dieß der Fall sein? — Da der unter dem Niveau mn befindliche Theil der schwereren Flüssigkeit für sich selbst im Gleichgewicht ist, so handelt es sich nur noch um die Säulen pn und mo; wenn Gleichgewicht stattfinden soll, so müssen diese Säulen offenbar einen gleich großen Druck auf die unter dem Niveau mn liegende

Flüssigkeit ausüben und dies ist der Fall, wenn ihre Höhen sich umgekehrt verhalten, wie ihre Dichten. Verhält sich also z. B. die Dichte der einen Flüssigkeit zur Dichte der andern, wie 5 zu 1, so muß die Säule der letztern (mo) 5mal so hoch sein, als die der erstern (np). Hieraus ergibt sich der Satz:

Flüssigkeiten von verschiedener Dichte, welche in kommunizirenden Gefässen enthalten sind, stehen in diesen so, daß sich die Höhen ihrer Spiegel über dem untern Niveau der dichteren Flüssigkeit umgekehrt verhalten, wie ihre Dichten.

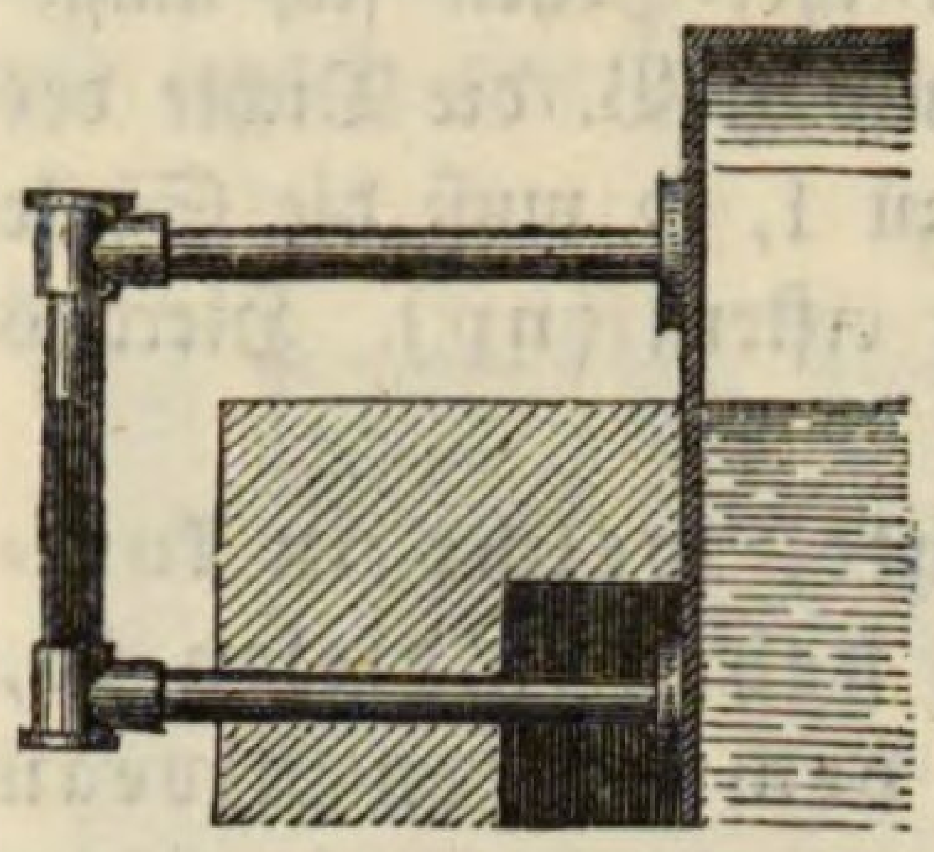


Ist die eine von zwei kommunizirenden Röhren kürzer, als die andere und füllt man beide, indem man die kürzere verschließt, so muß der Gegenstand, welcher zum Verschluß dient, das Gewicht der fehlenden Flüssigkeitssäule durch den Druck ersetzen, den er der Säule in der längeren Röhre entgegenstellt. Oeffnet man den Verschluß, so tritt die Flüssigkeit aus der kürzern Röhre aus, und würde sich bis zum Niveau in der längern Röhre erheben, wenn nicht durch den Luftwiderstand und durch das Zurückfallen eines Theils der Flüssigkeit auf den aufsteigenden Strahl dieser etwas zurückgedrängt würde; in Folge dessen erreicht der Strahl jene Höhe nicht ganz (s. die Figur).

Anwendungen der kommunizirenden Röhren.

Von dem Gesetz der kommunizirenden Röhren machen wir vielfältigen Gebrauch. Unsere gewöhnlichen **Küchenlampen**, die aus einem weiten Oelgefäß und einem nach oben sich verengenden röhrenförmigen Ansatz, durch den der Docht gezogen ist, bestehen, sind eine Anwendung desselben. Da das Oel in den beiden kommunizirenden Gefässen gleich hoch steht, so darf das weite Gefäß weder zu voll noch zu leer sein: ist es zu voll, so erstickt die Flamme durch den zu starken Andrang des Oels; ist es zu leer, so zieht sich nicht die erforderliche Menge Oel durch den Docht hindurch bis zum brennenden Ende, dieser verkohlt und die Flamme wird trüb und matt. Auch unsere **Hänglampen**, bei denen ein hohler, ringförmiger Körper den Oelbehälter bildet, von welchem aus das Oel durch zwei abwärtslaufende Röhrenstücke dem Docht zugeführt wird, bilden kommunizirende Röhren.

Um den Stand des Wassers in den Dampfkesseln beobachten zu können, sind gewöhnlich außen Glasröhren, sogenannte **Standmesser**, angebracht (s. die umstehende Figur), die oben und unten mit dem Innern der

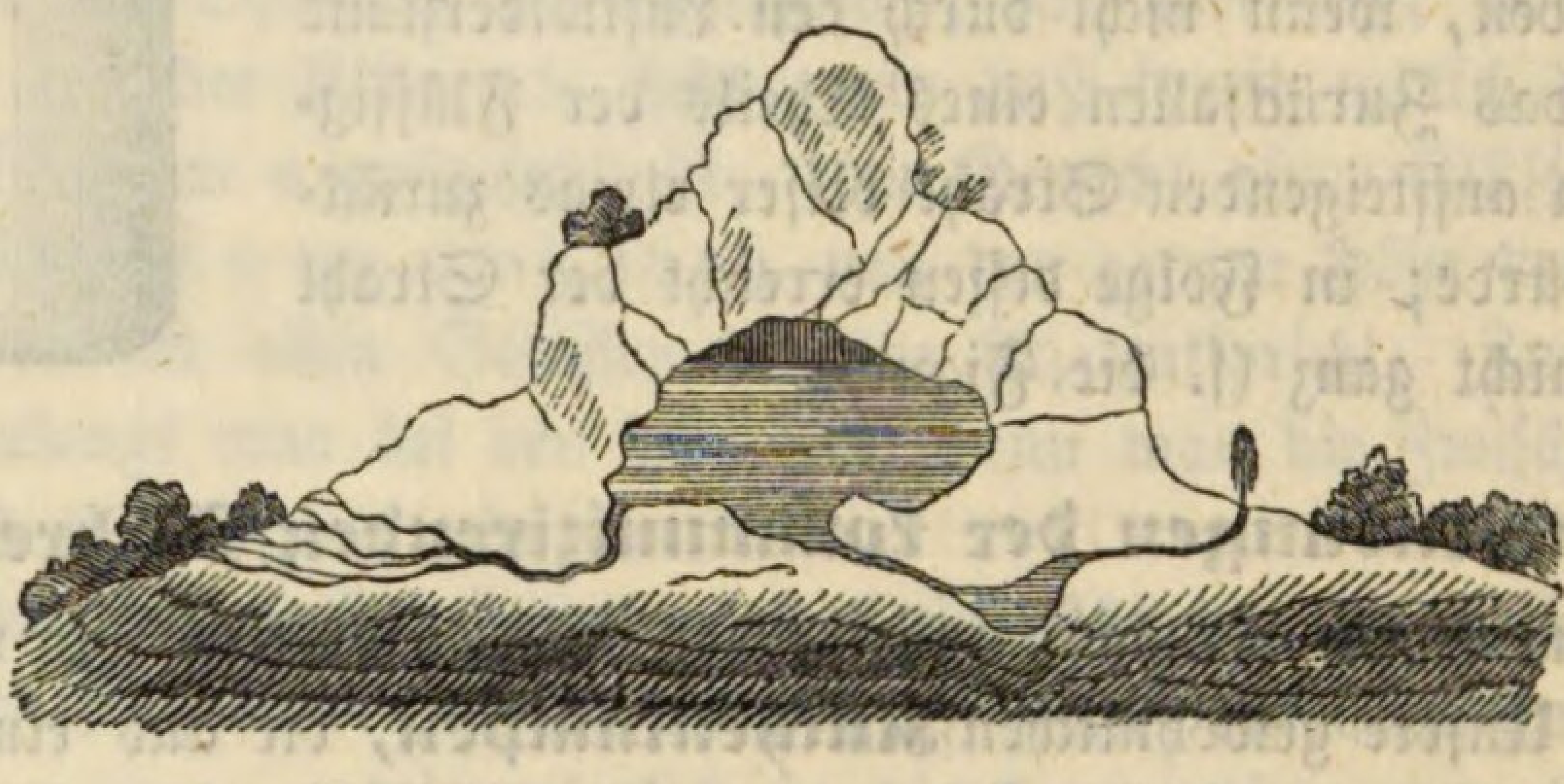


Kessel in Verbindung stehen, und in denen daher das Wasser stets gleich hoch steht, wie in den Kesseln selbst.

Bei der **Kanalwage** benutzt man den Stand des Wassers in zwei kommunizirenden Glasröhren, um beim Nivelliren genau wagrechte Linien zu erhalten.

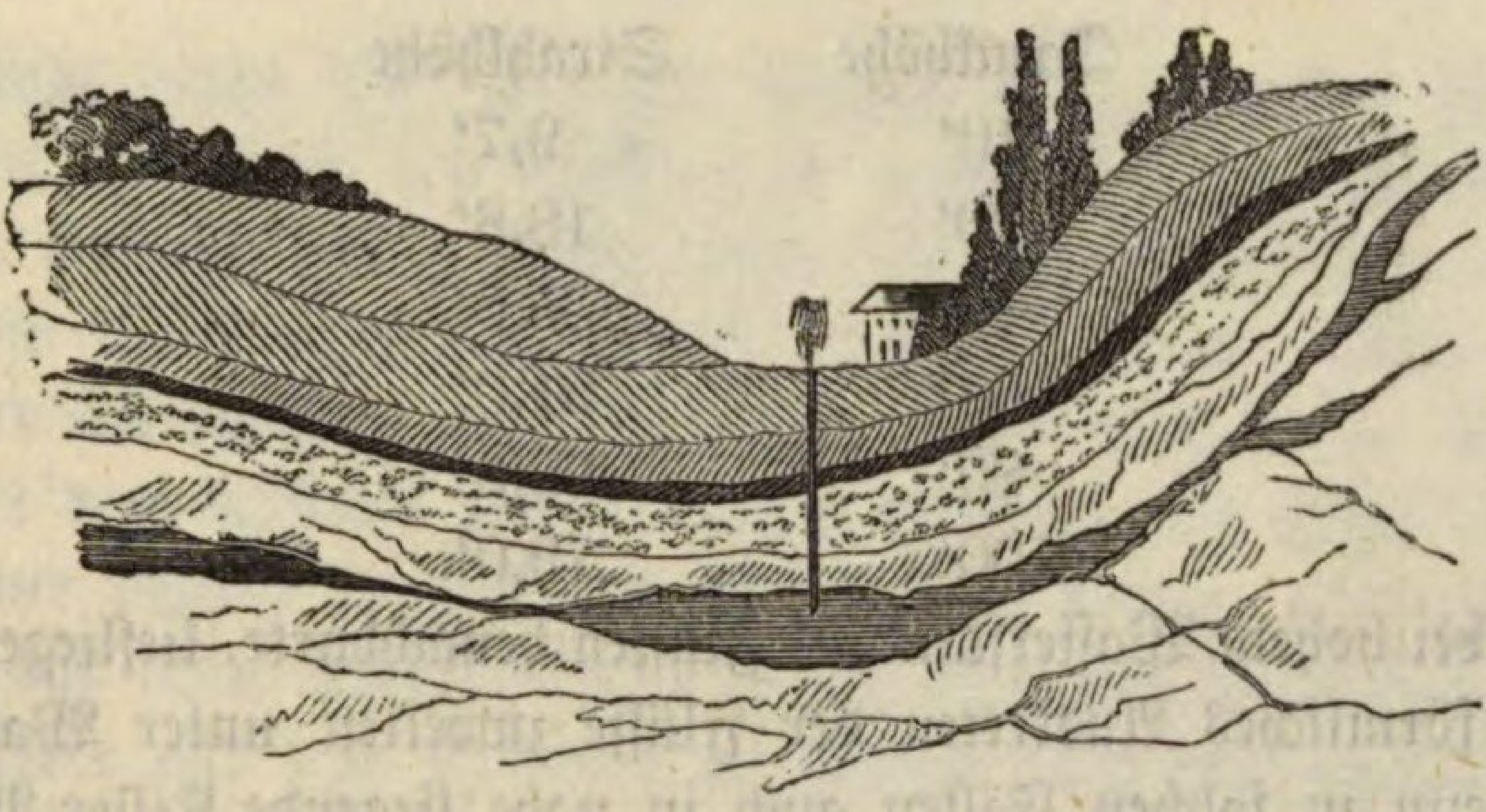
Anwendungen der kommunizirenden Röhren im Großen sehen wir in den Wasserleitungen, in manchen Quellen, in den artesischen Brunnen, in natürlichen und künstlichen Springbrunnen rc.

Wasserleitungen dienen dazu, Wasser in Röhren von einem Ort zum andern zu führen. Nach dem obigen Gesetz ist dieß nur dann möglich, wenn der zweite Ort nicht höher liegt, als der erste, von welchem das Wasser hergeleitet wird. — Wenn Felsenspalten oder andere Kanäle im Innern der Erde oder auch nur lockere Erdschichten einerseits mit hoch liegenden, großen Wasserbehältern, Höhlen u. dergl. in Verbindung stehen und anderseits nahe an der Erdoberfläche münden (wie dieß in



unserer Zeichnung veranschaulicht ist), so tritt hier das Wasser, wie aus dem kürzeren Theil zweier kommunizirender Röhren, bald in einem einzigen großen Strahl, bald in vielen kleinen Zweigen aus, und bildet **Brunnen** und **Quellen.**

Dergleichen wasserführende Kanäle gibt es im Innern der Erde in großer Menge; aber wohl die meisten führen nicht zur Oberfläche der Erde, von der sie häufig durch dichte Felsenschichten, Lehm- und Thonlager, welche dem Wasser den Durchgang nicht gestatten, getrennt sind. In diesem Fall kann dem Wasser dadurch der Austritt verschafft werden, daß man sogenannte Bohrlöcher, in welche Röhren eingelassen werden (s. die folgende Figur), durch die darüber liegenden dichten Schichten treibt, nnd auf diese Weise eine künstliche Verbindung zwischen der Erdoberfläche und den wasserführenden Gängen in der Tiefe herstellt. (Es ist natürlich, daß diese Gänge mit höher gelegenen Wasserbehältern in Verbindung stehen



müssen.) Diese Quellen sind unter dem Namen der **artesischen** *) **Brunnen** bekannt. Einer der großartigsten Brunnen dieser Art ist der 548 Meter oder 1686 Par. Fuß tiefe am Schlachthaus von Grenelle in Paris, den der Mechaniker Mülot nach zahllosen Schwierigkeiten und Unfällen hergestellt hat (26. Februar 1841), und der in 24 Stunden 3000 Kubikmeter oder 87484 Par. Kubikfuß (über 10000 württ. Eimer) Wasser liefert.

Künstliche Springbrunnen erhält man, wenn man mittelst Röhrenleitungen das Wasser aus einem hochgelegenen Bassin an einen niedrigeren Ort führt und hier aus einer kurzen Röhre austreten und in die Höhe steigen läßt. (Zur Unterscheidung von einer zweiten Art, welche wir später aufführen werden, heißen diese hydrostatische Springbrunnen.) Um das Zurückfallen des Wassers auf den aufsteigenden Strahl und das dadurch verursachte Herabdrücken desselben zu verhindern, stellt man häufig das Ausflußrohr nicht ganz senkrecht, sondern gibt ihm eine etwas schiefe Richtung.

Bei der Bewegung des Wassers in den Röhrenleitungen entwickelt sich ein Reibungswiderstand an den Röhrenwandungen, der um so größer ist, je schneller das Wasser fließt. Dadurch wird seine Geschwindigkeit, und in Folge dessen die Strahlhöhe sehr merklich vermindert. Um diesen Reibungswiderstand so viel als möglich zu beschränken, ist es gerathen, ziemlich weite Röhren anzuwenden. Auch die Form und verhältnißmäßige Größe der Ausflußöffnung ist von Einfluß auf die Strahlhöhe; in dieser Beziehung hat man durch Versuche festgestellt, daß eine in einer dünnen Platte angebrachte Oeffnung, die ungefähr ein Sechstel des Querschnitts der Röhre beträgt, die zweckmäßigste Anordnung ist. Endlich hat man gefunden, daß auch unter den günstigsten Verhältnissen die Strahlhöhe um so weiter hinter der Druckhöhe zurückbleibt, je größer diese ist. Man hat in dieser Beziehung durch Versuche folgende Ergebnisse erhalten:

*) Sie haben ihren Namen von der Grafschaft Artois in Frankreich, wo sie zuerst in Anwendung gekommen sind.

Druckhöhe	Strahlhöhe
10′	9,7′
20′	18,8′
40′	35,5′
60′	51,0′
80′	68,5′
100′.	79,0′.

Wenn bei hohem Wasserstand in Flüssen benachbarte, tiefliegende Felder auch ohne förmliches Austreten der Flüsse zuweilen unter Wasser gesetzt werden, wenn in solchen Fällen auch in nahe liegende Keller Wasser tritt u. s. w., so ist dieß eine Folge davon, daß das Bett der Flüsse und jene Felder, Keller ꝛc. durch lockern Grund in Verbindung stehen, und gleichsam kommunizirende Röhren bilden.

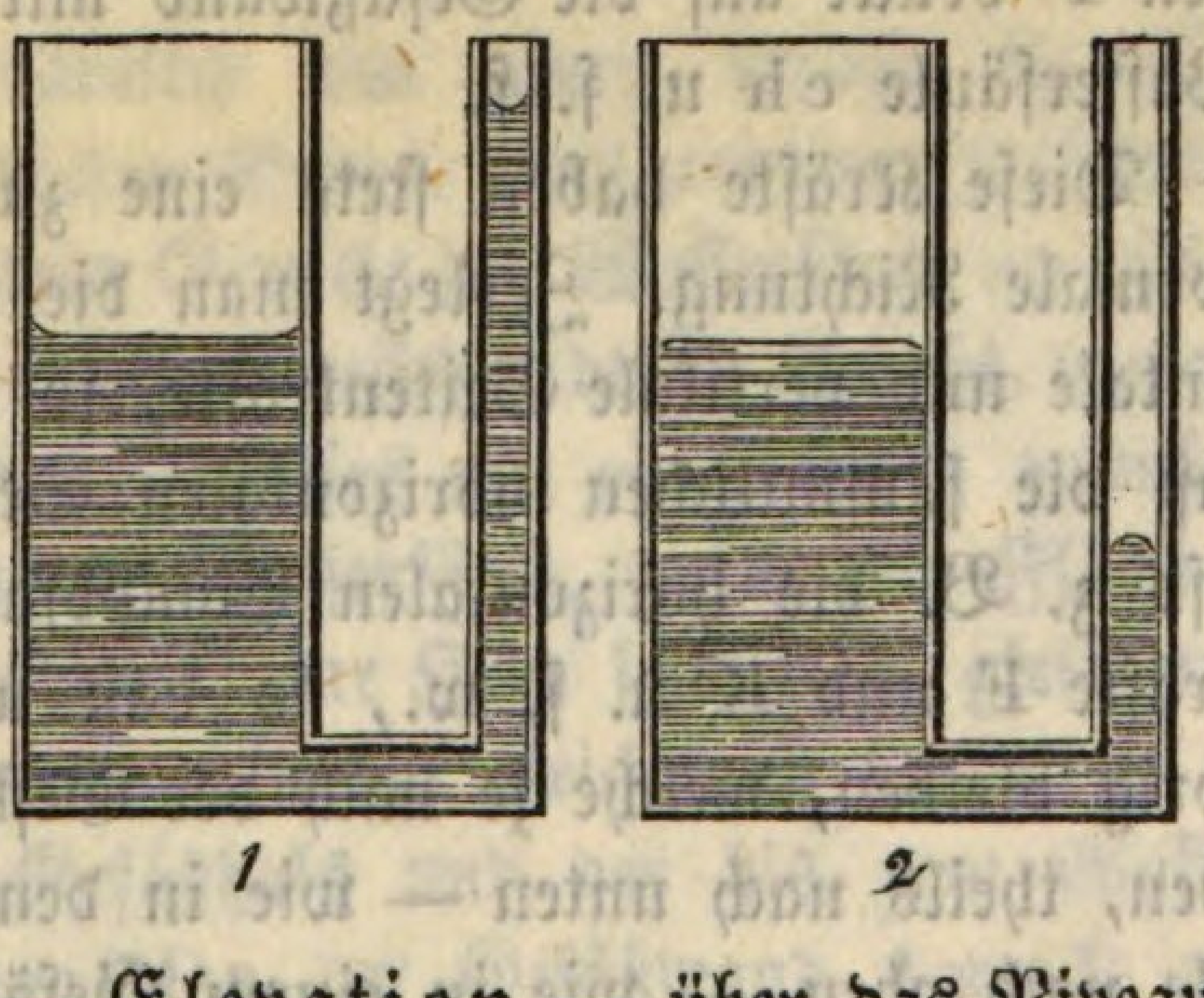
Das Gesetz über kommunizirende Röhren leidet eine Beschränkung, sofern es auf sehr enge Röhren nicht anwendbar ist. Wählen wir nämlich zu unsern Versuchen mehrere enge Röhren von verschiedenem Durchmesser im Lichten, so werden wir im ersten Augenblick nicht wenig überrascht sein, das Niveau der Flüssigkeit, obigem Gesetz entgegen, in den verschiedenen Röhren verschieden hoch stehen zu sehen. Die Ursache dieser Erscheinung liegt jedoch nicht fern: stellt oder taucht man zwei ebene Glastafeln in Wasser, so daß sie einander parallel sind, und rückt man sie in dieser Stellung immer näher zusammen, so wird der dazwischen liegende, ebene Theil des Wasserspiegels immer kleiner, bis er endlich ganz verschwindet und der Spiegel des Wassers in eine einzige konkavgewölbte Fläche übergeht. An diesem Punkt angelangt, gibt es zwischen den beiden Tafeln kein auf der Oberfläche befindliches Massentheilchen mehr, das nicht von der einen oder andern Tafel angezogen würde; rückt man aber diese noch näher zusammen, so werden die in der Mitte zwischen ihnen liegenden Flüssigkeitstheilchen von beiden zugleich angezogen, und eben deßhalb auch höher gehoben, als wenn die Anziehung nur einseitig stattfände. Hebt sich das Niveau in der Mitte, so steigt es auch am Rand, weil nach dem Früheren hier die Flüssigkeit immer den höchsten Stand hat. So kommt es, daß die ganze, zwischen den Tafeln befindliche Flüssigkeitssäule in die Höhe geht und dies so lange, bis sich das Gewicht der gehobenen Säule und die Adhäsionskraft das Gleichgewicht halten. Mit der Annäherung der Tafeln nimmt die Höhe der Flüssigkeitssäule zu, und zwar im umgekehrten Verhältniß der Entfernung der Tafeln von einander; werden also die Tafeln auf die halbe Entfernung zusammengerückt, so steigt die Wassersäule zur doppelten Höhe.

Dieselbe Erscheinung zeigt sich auch in kommunizirenden Röhren, deren

innere Wände einen sehr geringen Abstand von einander haben; und zwar ist die Erhebung des Wassers in engen Röhren deßhalb viel beträchtlicher, weil ein gleich großer Theil des Wasserspiegels von viel mehr Punkten der ihn umgebenden Wand angezogen wird. Man hat durch Versuch und Berechnung ermittelt, daß, wenn der innere Durchmesser einer Röhre dem Abstand zweier Tafeln gleich ist, die Höhe der Wassersäule in jener doppelt so groß ist, als zwischen diesen. Daraus folgt von selbst, daß das oben ausgesprochene Gesetz über das Verhältniß der Höhe der Wassersäule und des Abstands der Wände auch für enge Röhren gilt, wenn man statt des Abstands der Tafeln den innern Durchmesser der Röhren in dasselbe aufnimmt.

Vertauschen wir in den obigen Versuchen das Wasser mit Quecksilber oder mit irgend einer andern Flüssigkeit, welche gegen Glas eine sehr geringe Adhäsion äußert, so tritt der Spiegel der Flüssigkeit, wie es sich durch ähnliche Betrachtungen, wie die obigen, leicht erklären läßt, zwischen den Glastafeln unter das Niveau der umgebenden Flüssigkeit zurück; ebenso steht das Quecksilber in engen Röhren tiefer, als in weiten, die mit denselben in Form von kommunizirenden Gefässen verbunden sind. Auch hier richtet sich die verhältnißmäßige Tiefe, zu der die Flüssigkeit zurücksinkt, im Sinne des vorhin angegebenen Gesetzes nach der Weite der Röhren, und wir können daher den Satz ganz allgemein aussprechen:

Wenn enge Röhren mit weiteren Gefässen kommunizirende Röhren bilden, so stehen im Allgemeinen die Flüssigkeiten in denselben nicht in gleicher Höhe; und zwar ist der senkrechte Abstand der Spiegel in dem Maße größer, als der innere Durchmesser der engen Röhren kleiner ist.



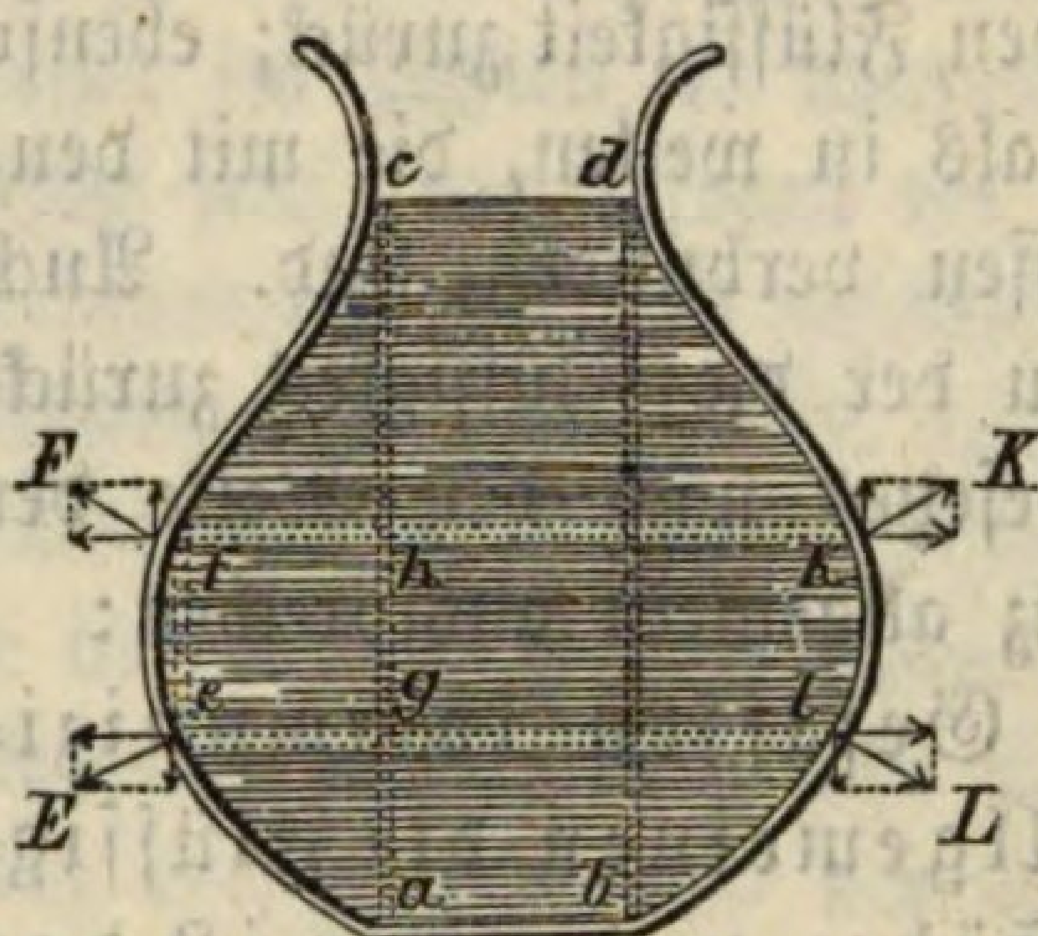
1 2

Man ist gewohnt, die Wirkung der Adhäsion in engen Röhren mit dem Namen Haarröhrchenanziehung oder Capillarität zu bezeichnen, obgleich sich dieselbe nicht bloß bei haarfeinen, sondern überhaupt bei Röhren von sehr kleinem Durchmesser im Hohlen zeigt. Die hier beigefügten Figuren zeigen die Capillaritätserscheinungen: Fig. 1 die Erhebung — Elevation — über das Niveau, und Fig. 2 das Zurücktreten — Depression — unter das Niveau der Flüssigkeit in dem weiten Gefäß.

Druck der Flüssigkeiten auf den Boden und die Seitenwände der Gefäße.

Der Druck, welchen die Moleküle flüssiger Körper durch ihre Schwere auf einander ausüben, pflanzt sich auch auf den Boden und die Wände der Gefäße fort, in welchen sie enthalten sind. Soll daher Gleichgewicht bestehen, so müssen diese durch ihre Festigkeit einen diesem Druck gleichen Widerstand zu leisten im Stande sein; im andern Fall werden sie entweder weichen oder zerbrechen. Wir erkennen die Wirkungen dieses Drucks in der straff angespannten Haut einer mit Wasser gefüllten Blase, in dem Widerstand, den ein voller, lederner Weinschlauch dem Zusammendrücken entgegenstellt, in dem Zerspringen der Brunnenröhren, im Bersten der Fässer u. s. w.

In dem hier abgebildeten Gefäß drückt das Wassertheilchen a auf den Boden desselben mit einer Kraft gleich dem Gewicht der Wassersäule ac;



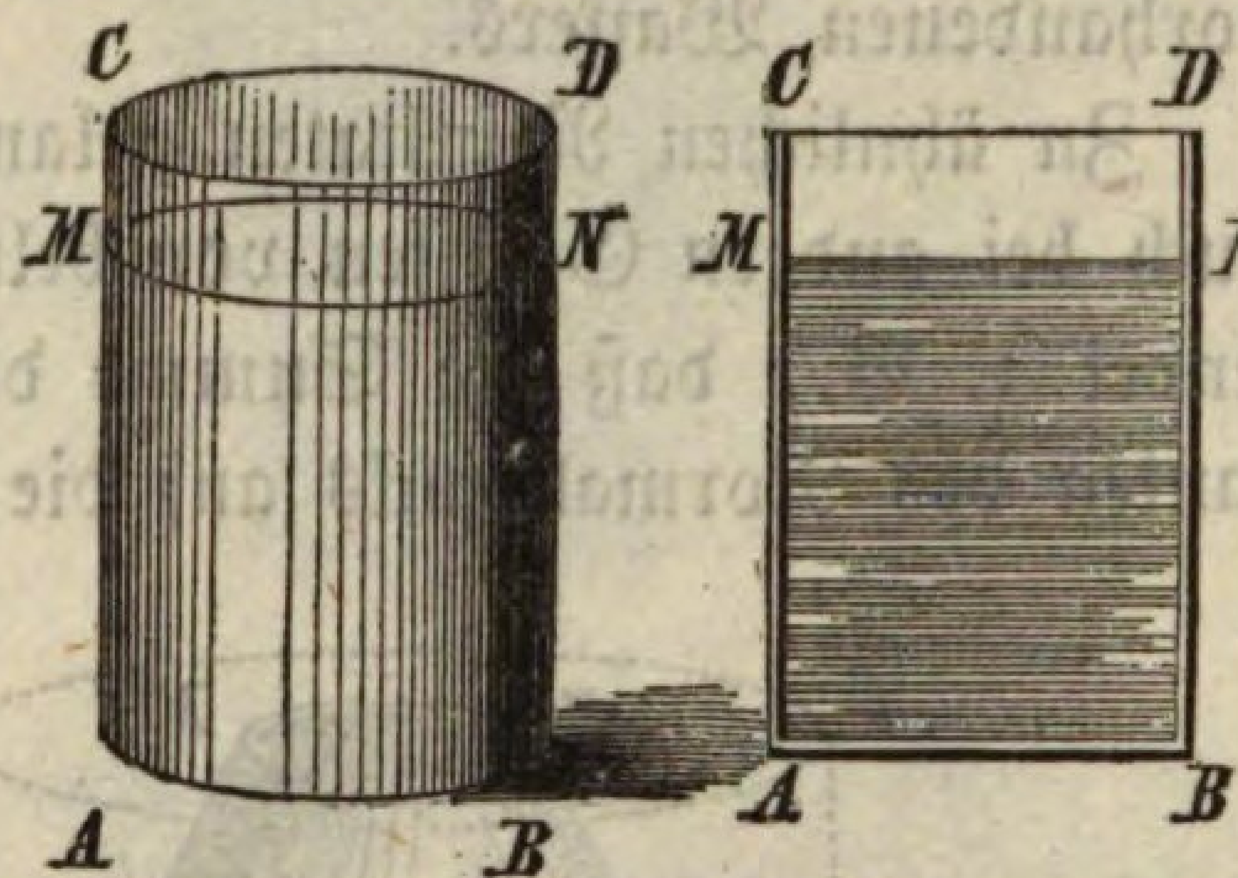
das Gleiche gilt von allen übrigen mit dem horizontalen Boden des Gefäßes in Berührung stehenden Wassertheilchen, und es ist daher der Gesammtdruck, den der Boden erleidet, gleich dem Gewicht der Wassersäule a b d c. Das Wassertheilchen e drückt die Seitenwand mit einer Kraft E gleich dem Gewichte der Wassersäule c g, da jedes Wassertheilchen der Schicht e l, also auch e, unter dem gleichen Druck steht, wie g oder irgend ein anderes vertikal unter der freien Oberfläche c d liegendes Theilchen dieser Schicht. Das Theilchen F drückt auf die Gefäßwand mit einer Kraft gleich dem Gewicht der Wassersäule c h u. s. f.

Diese Kräfte haben stets eine zu den betreffenden Flächenelementen normale Richtung. Zerlegt man die Kräfte E, F, K, L u. s. f. in horizontale und vertikale Seitenkräfte, so lehrt eine gründlichere Untersuchung, daß die sämmtlichen horizontalen Seitenkräfte sich gegenseitig aufheben, also z. B. die horizontalen Composanten der Kräfte E und L, die der Kräfte F und K u. s. w., so daß nur noch die vertikalen Composanten übrig bleiben, welche je nach der Gestalt der Gefäße entweder theils nach oben, theils nach unten — wie in dem oben abgebildeten Gefäß —, oder alle nach oben — wie in einem Gefäß, das vom Boden an nach oben immer enger wird —, oder alle nach unten — wie in einem Gefäß, das nach oben sich erweitert — gerichtet sind. Bei einem Gefäß mit vertikalen Wänden entstehen gar keine vertikalen Composanten.

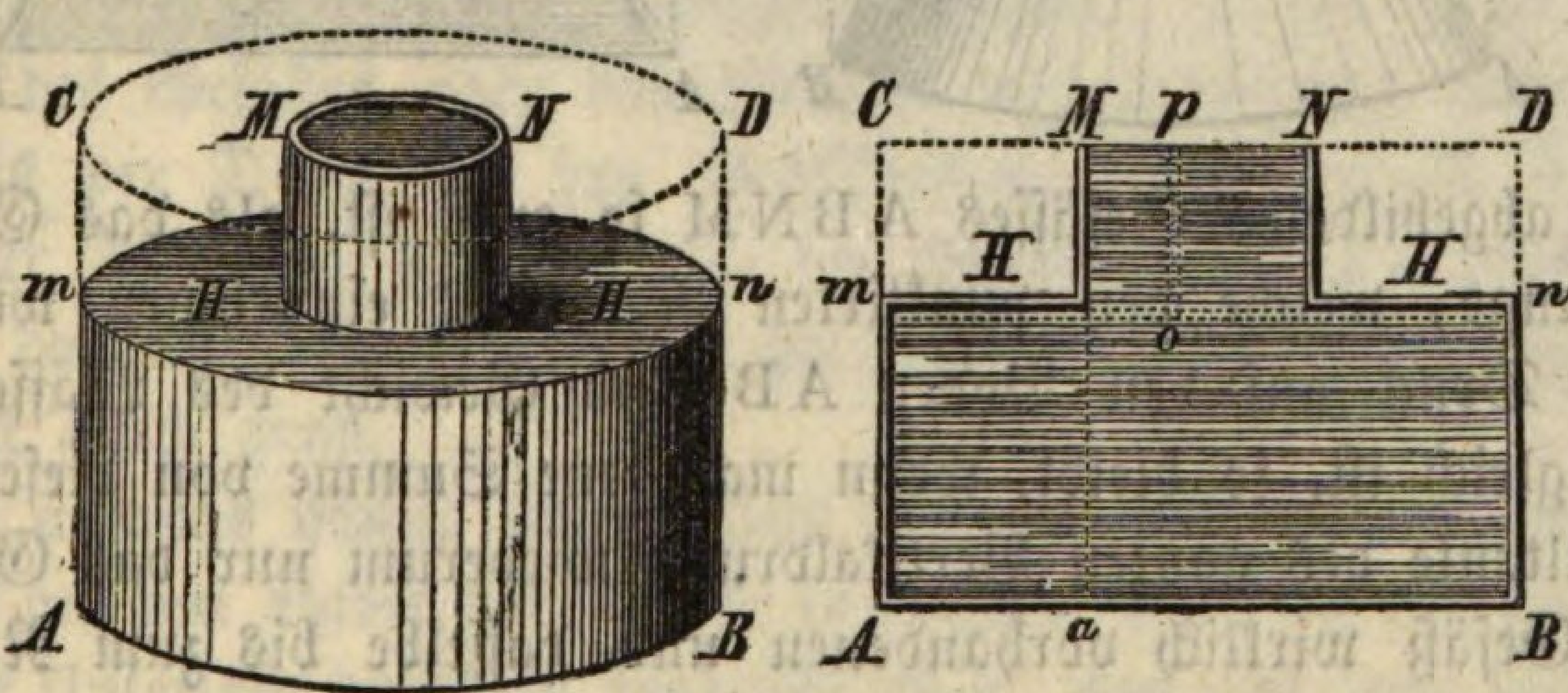
Setzen wir diese vertikalen Kräfte mit dem vertikal abwärts gerichteten

Druck auf den Boden zusammen, so erhalten wir eine mit ihnen parallele Mittelkraft, welche die Größe des Drucks angibt, womit das Gefäß durch das in demselben enthaltene Wasser gegen die Unterlage, auf der es ruht, gedrückt wird; diese Resultante ist stets gleich dem Gewicht des im Gefäß enthaltenen Wassers, wie wir an einigen einfachen Beispielen zeigen wollen.

Haben wir ein Gefäß ABDC, das nur vertikale Wände hat, so ist der Druck auf diese horizontal und es sind also keine vertikale Composanten vorhanden. Der Druck auf den Boden, der nach dem, was früher gesagt worden ist, dem Gewicht der Wassersäule ABNM gleichkommt, ist also, wenn wir das Gewicht des Gefässes selbst vernachläßigen, die einzige Kraft, womit dieses gegen seine Unterlage gedrückt wird.



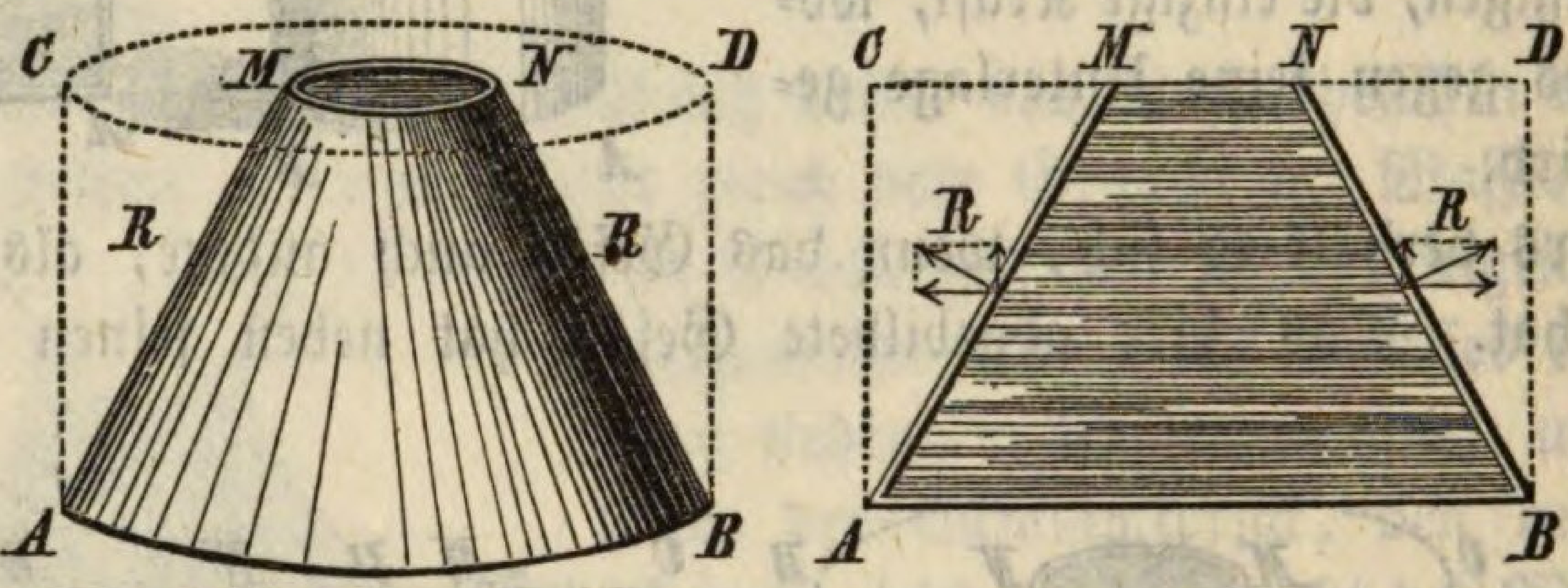
Anders verhält es sich, wenn das Gefäß auch andere, als vertikale, Wände hat. Das hier abgebildete Gefäß hat neben seinen vertikalen



Wänden auch eine horizontale, nämlich den obern Boden H. Der Druck, dem ein Theilchen o der diesen Boden berührenden Horizontalschicht mn unterworfen ist, kommt dem Gewicht der Wassersäule op gleich; unter dem gleichen Druck steht jedes andere Theilchen dieser Schicht, woraus hervorgeht, daß der obere Boden des Gefässes mit einer Kraft aufwärts gedrückt wird gleich dem Gewicht einer Wassersäule, welche die Fläche H zur Grundfläche und die Linie po = mC zur Höhe hat, d. h. gleich dem Gewicht der Wassermasse, welche den — in der Zeichnung punktirten — Raum zwischen dem cylindrischen Gefäßhals und der bis zum Wasserspiegel MN reichenden Fortsetzung mCDn der Gefäßwand AmnB ausfüllen würde. — Nun ist aber der Druck auf den untern Boden des Gefässes so groß, als das Gewicht eines Wassercylinders, welcher diesen Boden zur Grundfläche und die Höhe des Niveau's über demselben zur Höhe hat, d. h. gleich dem Gewicht einer Wassermenge, welche den ganzen

Raum des Cylinders ABDC einnehmen würde. Die Kraft, mit welcher das Gefäß in Folge des Wasserdrucks senkrecht abwärts getrieben wird, oder die Resultante aus dem Druck nach unten und dem nach oben ist daher gleich dem Gewicht des Wassercylinders ABDC weniger dem Gewicht derjenigen Wassermenge, welche den in unserer Zeichnung punktirten Raum über der horizontalen Wand H ausfüllen würde. Dieser Unterschied ist aber nichts anderes, als das Gewicht des im Gefäß wirklich vorhandenen Wassers.

Zu ähnlichen Resultaten gelangt man mit Hülfe mathematischer Sätze auch bei andern Gefässen von beliebig gestalteten, schiefen Wänden. Man findet z. B., daß die Summe der vertikal aufwärts gerichteten Composanten des Normaldrucks auf die verschiedenen Theile der schiefen Wand



des hier abgebildeten Gefässes ABNM so groß ist, als das Gewicht der Wassermenge, welche den punktirten Raum R einnehmen würde. Da aber der Druck auf den Boden AB dem Gewicht des Wassercylinders ABDC gleich ist, so bleibt, wenn man jene Summe von diesem abzieht, als Resultante des ganzen Vertikaldrucks wiederum nur das Gewicht des in dem Gefäß wirklich vorhandenen und dasselbe bis zum Niveau MN erfüllenden Wassers übrig.

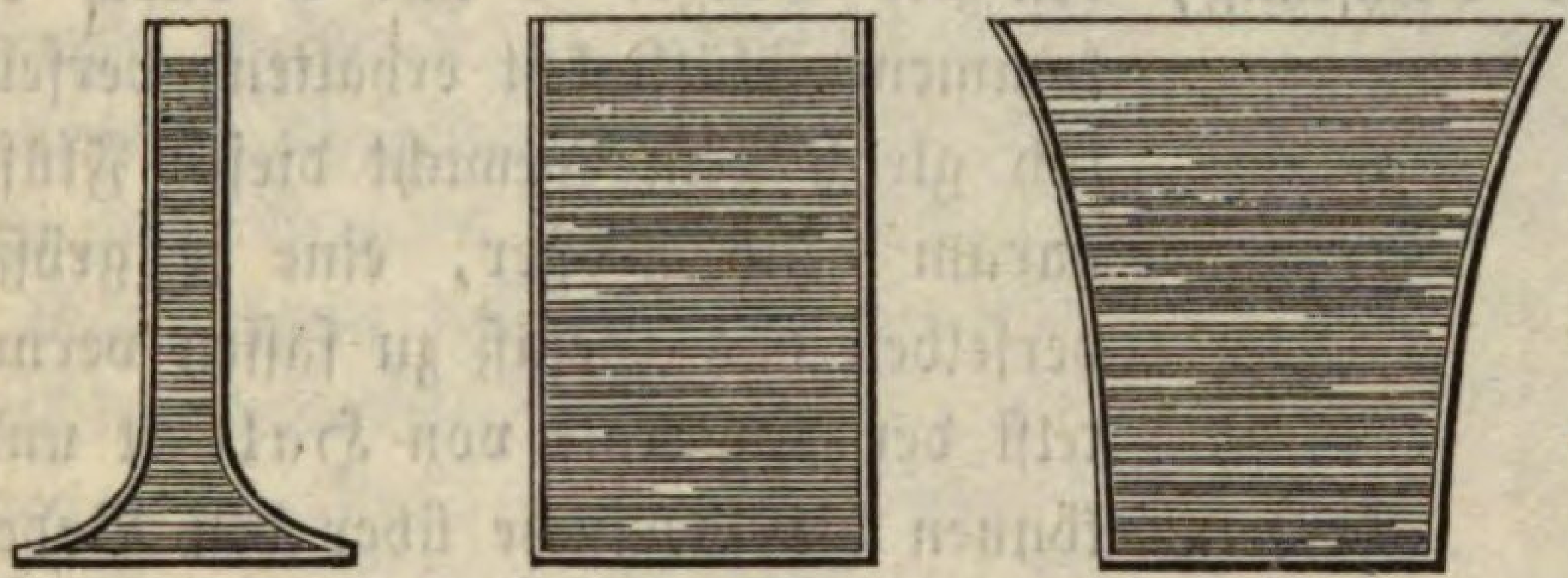
Aus diesen Betrachtungen über den Vertikaldruck der flüssigen Körper leiten sich die zwei folgenden Gesetze ab:

1) Der Druck, den der horizontale Boden eines Gefässes von der darüber stehenden Flüssigkeit erleidet, ist so groß, als das Gewicht einer Flüssigkeitssäule, deren Grundfläche dem Boden, und deren Höhe dem senkrechten Abstand des Spiegels der Flüssigkeit von dem Boden des Gefässes gleich ist.

2) Der Druck, den eine in einem Gefäß enthaltene Flüssigkeit auf die Unterlage, auf welcher das Gefäß ruht, ausübt, ist so groß, als das Gewicht der Flüssigkeit.

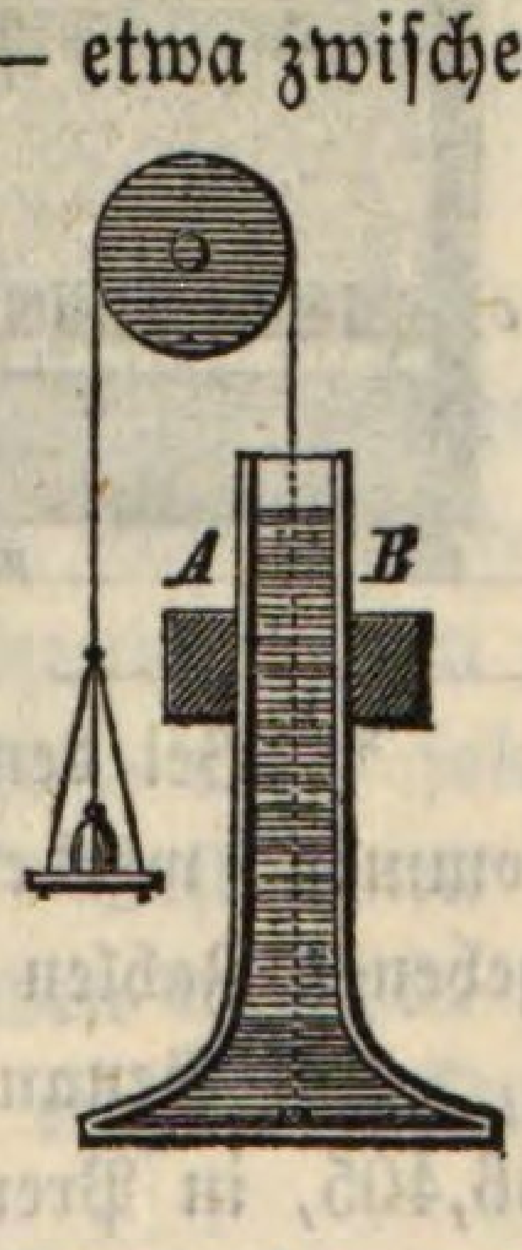
Der Druck auf den Boden ist nach dem ersten Gesetz — eine bestimmte Flüssigkeit vorausgesetzt — einzig und allein durch die Größe des Bodens und die Höhe der Flüssigkeit bedingt; dagegen ist er unabhängig von der

Masse der Flüssigkeit und — was damit zusammenhängt — von der Gestalt des Gefässes. Umgekehrt hängt nach dem zweiten Gesetz der Druck auf die Unterlage nur von der Masse der Flüssigkeit ab, während die Größe des Bodens und die Höhe der Flüssigkeitssäule keinen Einfluß darauf haben, insoweit nicht die Masse der Flüssigkeit dadurch bedingt ist.

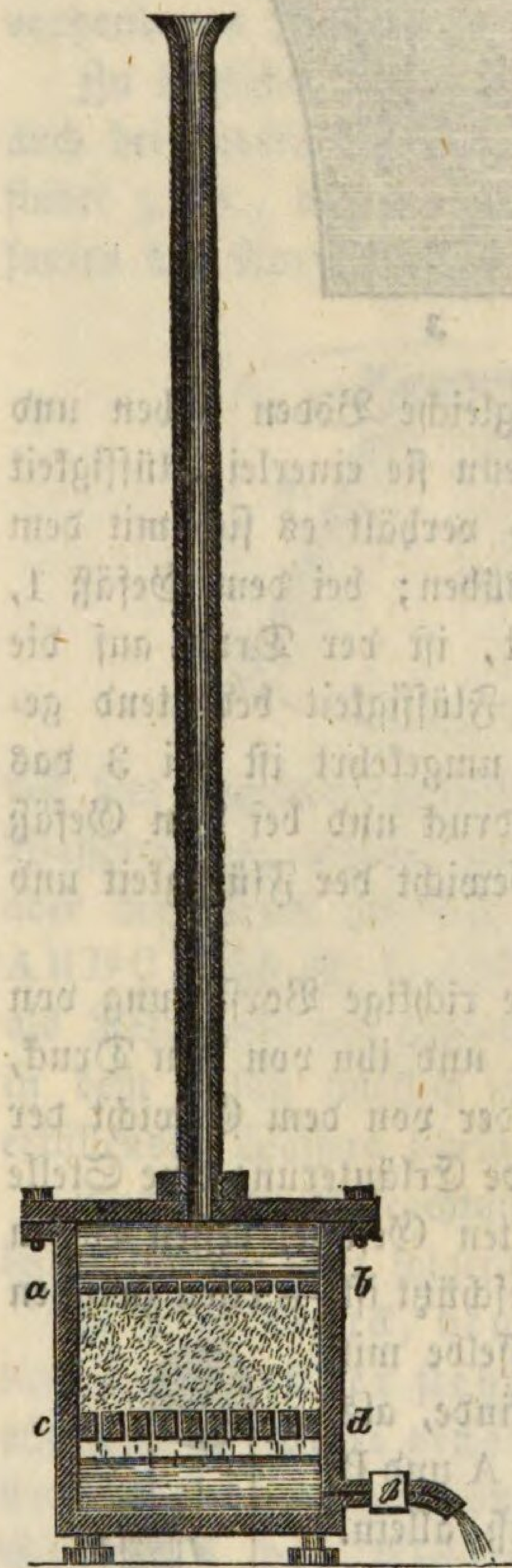


In den hier abgebildeten Gefässen, welche gleiche Böden haben und in denen die Flüssigkeit gleich hoch steht, ist, wenn sie einerlei Flüssigkeit enthalten, der Bodendruck gleich groß; anders verhält es sich mit dem Druck, den sie auf die Unterstützungsfläche ausüben; bei dem Gefäß 1, welches die geringste Menge Flüssigkeit enthält, ist der Druck auf die Unterlage des Gefässes oder das Gewicht der Flüssigkeit bedeutend geringer, als der Druck auf den Gefäßboden; umgekehrt ist bei 3 das Gewicht der Flüssigkeit größer, als der Bodendruck und bei dem Gefäß 2 endlich, das nur vertikale Wände hat, sind Gewicht der Flüssigkeit und Bodendruck gleich groß.

Da es anfangs häufig schwer fällt, sich eine richtige Vorstellung von dem Druck auf den Boden der Gefässe zu machen, und ihn von dem Druck, der auf die Unterlage derselben ausgeübt wird, oder von dem Gewicht der Flüssigkeit zu unterscheiden, so möge noch folgende Erläuterung eine Stelle finden. Befestigen wir eines der oben abgebildeten Gefässe, dessen Boden fest angemacht sei, so daß es vor dem Fallen geschützt ist — etwa zwischen den zwei Trägern A und B, und füllen wir dasselbe mit Wasser, so drückt dieses sowohl auf die Seitenwände, als auf den Boden des Gefässes, und auch die Träger A und B sind stärker belastet, als durch das leere Gefäß allein. Nun werde plötzlich der Boden ringsum vom Gefäß abgelöst: die Folge davon wird die sein, daß ihn das Wasser wegdrückt und aus dem Gefässe ausläuft. Soll das Ausfließen des Wassers verhindert werden, so dürfen wir nur den Boden an den Rand des Gefässes andrücken, sei es mit der Hand, oder mittelst eines Gewichtes, das durch eine über eine Rolle gehende Schnur am Boden befestigt ist, wie es die Figur zeigt. — Wenn wir das Gewicht des Bodens selbst nicht



mit einrechnen, so ist die Kraft, welche wir dabei anwenden, gleich dem Druck, den der Boden auszuhalten hat, da wir nur diesen, und nicht das Gefäß selbst, festhalten müssen. Unter den oben bezeichneten Voraussetzungen ist diese Kraft gleich groß, welches der drei Gefässe wir bei dem Versuch auch anwenden. — Verschieden von dieser Kraft ist der Zuwachs an Belastung, den die Träger A und B durch die hinzugekommene Flüssigkeit erhalten; derselbe ist nämlich gleich dem Gewicht dieser Flüssigkeit, und darum desto größer, eine je größere Menge derselben das Gefäß zu fassen vermag. (Mittelst der Apparate von Haldat und Paskal können die Versuche über den Bodendruck sehr bequem angestellt werden.)



Um den Druck des Wassers auf den Boden eines Gefässes zu berechnen, müssen wir uns erinnern, daß ein Kubikcentimeter reines Wasser im Zustand seiner größten Dichtigkeit*), d. h. bei 4° über Null, 1 Gramm, oder ein Par. Kubikfuß 70 Par. Pfd.**) wiegt. Enthält also die Bodenfläche z. B. 100 Quadr.-Centim., und ist die Höhe der darüberstehenden Wassersäule gleich 1 Meter oder 100 Centimeter, so ist der Kubikinhalt der Säule 10000 Kubikcentimeter und ihr Gewicht 10000 Gramm oder 10 Kilogramm.

Auf dem Bodendruck des Wassers beruht **Real's Filtrir- oder Extraktionspresse.** Sie besteht aus einem ziemlich weiten cylindrischen Gefäß mit starken Wänden, und einer darauf befestigten langen Röhre, die in unserer Figur, im Verhältniß zu dem weiten Cylinder des Raumes wegen verkürzt abgebildet ist. Das cylindrische Gefäß ist durch zwei durchlöcherte Böden ab und cd, von denen der untere fest,

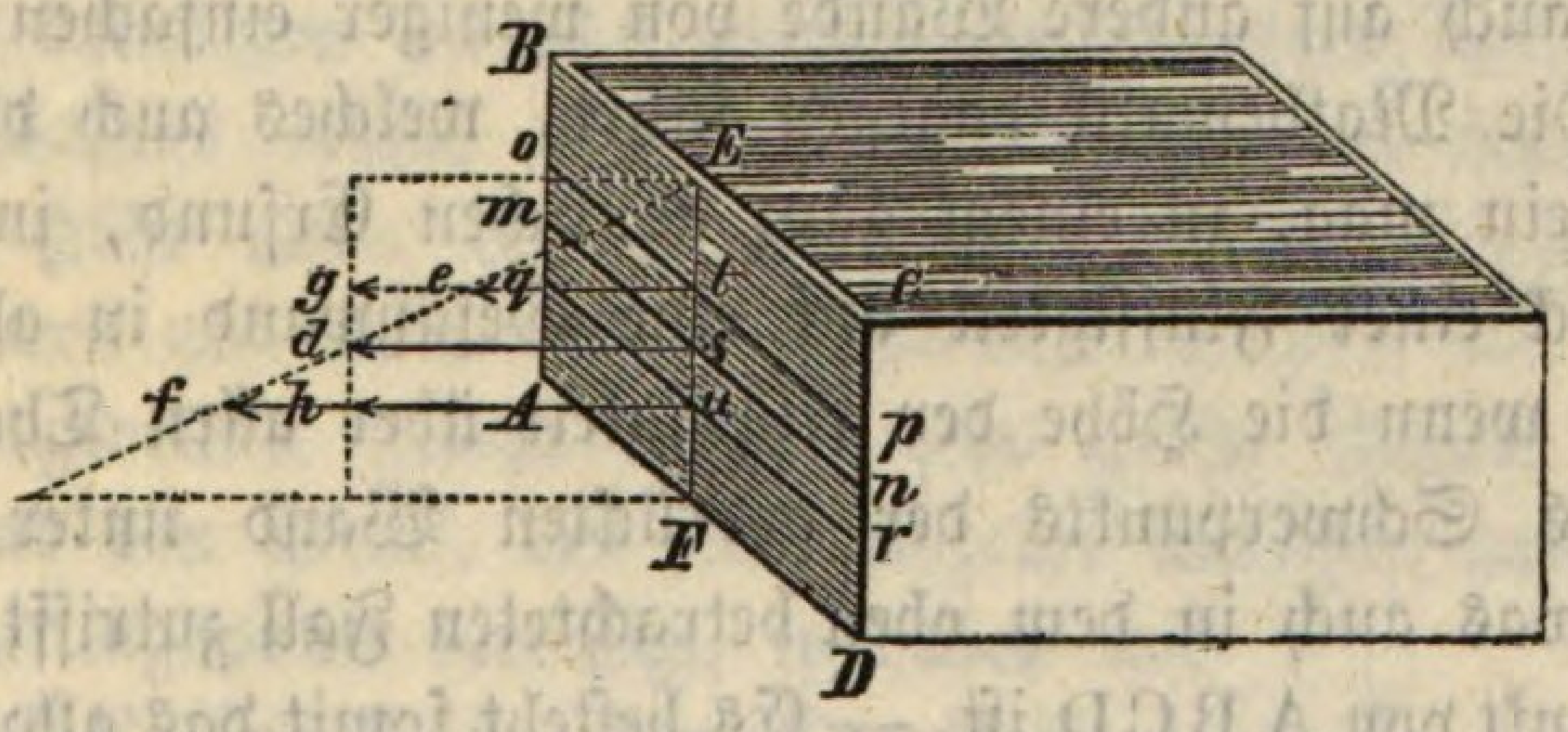
*) Bei den meisten Berechnungen, wie sie im gewöhnlichen Leben vorkommen, werden ganz unerhebliche Fehler entstehen, wenn wir die hier angegebenen Zahlen für Wasser von gewöhnlicher Temperatur überhaupt beibehalten.

**) Genau: 70,024 Par. Pfd. In Oestreich wiegt der Kubikfuß Wasser 56,405, in Preußen 66,1, in Bayern 44,038, in Hannover 53,284, in Würtemberg 50,276, in Sachsen 45,41, in Baden und in der Schweiz 54 Pfd. (Handelsgewicht des betreffenden Landes).

der obere dagegen beweglich ist, in 3 Räume abgetheilt. In den mittleren Raum, zwischen die beiden durchlöcherten Böden, bringt man den pulverisirten Körper, aus dem man einen Extrakt (Auszug) erhalten will; in den obern Raum gießt man durch die enge Röhre das Auflösungsmittel (Wasser, Weingeist u. dergl.); durch den starken Druck der hohen Säule wird nun die Flüssigkeit durch den im mittleren Raum befindlichen Körper hindurchgepreßt, wobei sie die auflöslichen Stoffe in sich aufnimmt, und durch den unteren durchlöcherten Boden in den untersten Raum abfließt, aus dem sie mittelst eines Hahnens abgelassen werden kann. Die Höhe der engen Säule kann beliebig gesteigert werden; es werden oft, wie es die Räumlichkeit gestattet und der Gebrauch erfordert, Säulen von 60 Fuß und darüber angewendet. Bei einer solchen Höhe beträgt der Druck, mit dem das Wasser durch das auszuziehende Pulver gepreßt wird, für den Fall, daß der durchlöcherte Boden einen Flächeninhalt von 2 Quadrat-Fuß habe, $2 \cdot 60 \cdot 70 = 8400$ Pfd. oder 84 Cntr., obgleich das ganze Gewicht des Wassers in der engen Röhre, wenn deren Querschnitt etwa ½ Quadratzoll beträgt, nur $\frac{1}{200} \cdot 60 \cdot 70 = 21$ Pfd. ausmacht.

Es bleibt uns zunächst noch übrig, die Größe des Drucks einer Flüssigkeit auf die Seitenwände des Gefässes, in welchem sie enthalten ist, näher in's Auge zu fassen.

Da der Druck einer Flüssigkeit auf eine Gefäßwand mit der Tiefe zunimmt, so sind gleich große Flächenstücke nur dann dem gleichen Druck ausgesetzt, wenn sie sich in der gleichen Horizontalebene befinden. Um



daher den Druck auf eine größere Fläche, wie z. B. auf die rechteckige Wand ABCD unserer Figur zu berechnen, denken wir uns dieselbe in lauter gleiche und dabei so außerordentlich schmale Horizontalstreifen zerschnitten, daß wir ohne erheblichen Fehler für alle Theile eines solchen Streifens den Druck als gleich groß annehmen können. Bestimmen wir alsdann den Druck für jeden einzelnen Streifen, so finden wir den Gesammtdruck auf die ganze Fläche, indem wir alle diese einzelnen Drücke in eine Gesammtsumme zusammenfassen.

Zum gleichen Ziel gelangen wir aber auf weit kürzerem Wege durch

folgende Betrachtung. Da die Streifen unter sich gleich groß sind, so hängt der Druck auf jeden einzelnen nur von seiner Tiefe unter dem Spiegel der Flüssigkeit oder, was dasselbe ist, von der Höhe der darüber stehenden Flüssigkeitssäule ab. Der Druck d auf den mittleren Streifen mn, den wir uns im Mittelpunkt s dieses Streifens vereinigt denken können, entspricht einer Flüssigkeitssäule von der Höhe $\frac{1}{2}$ EF; der Druck f auf den um die Größe su tiefer liegenden Streifen rq ist um eben so viel größer, als d, um wie viel der Druck e auf den Streifen op, der um die gleiche Größe (ts = su) höher liegt, kleiner ist, als d. Daraus folgt, daß die Summe der Drücke e und f das Doppelte des Drucks d beträgt, und daß dieselbe ganz ebenso groß ist, als wenn sowohl auf qr als auf op der gleiche Druck, wie auf den mittleren Streifen mn ausgeübt würde, d. h. wenn in u ein Druck h = d und in t ein Druck g = d stattfände. Dasselbe gilt von irgend zwei andern, in gleicher Entfernung unter und über mn liegenden Streifen, und wir ziehen daraus den Schluß, daß der Gesammtdruck auf die ganze Wand demjenigen gleichkommt, welcher auf sie ausgeübt wurde, wenn die Höhe der Flüssigkeit in allen Punkten = $\frac{1}{2}$ EG, d. h. gleich der halben Höhe der Wand wäre. Ist also beispielsweise die Höhe der Wand 4 Fuß, so ist der Druck auf dieselbe so groß, als wenn über allen Theilen derselben eine Flüssigkeitssäule von 2 Fuß Höhe stände. Beträgt die Breite der Wand 5 Fuß, so ist ihr Flächeninhalt 20 Quadr.-Fuß und daher der Gesammtdruck der Flüssigkeit auf dieselbe in Pariser Maß 20 . 2 . 70 = 2800 Pfd.

Die hier uns zu Gebot stehenden Mittel erlauben uns nicht, diese Betrachtung auch auf andere Wände von weniger einfachen Formen auszudehnen. Die Mathematik dagegen führt, welches auch die Gestalt der Gefäßwand sein mag, zu einem ganz ähnlichen Erfund, indem sie zeigt, daß der Druck einer Flüssigkeit auf eine Gefäßwand in allen Fällen so groß ist, als wenn die Höhe der Flüssigkeit über allen Theilen derselben der Tiefe des Schwerpunkts der gedrückten Wand unter dem Niveau gleich käme, was auch in dem oben betrachteten Fall zutrifft, da s zugleich der Schwerpunkt von ABCD ist. — Es besteht somit das allgemeine Gesetz:

Der Druck einer Flüssigkeit auf eine Gefäßwand ist gleich dem Gewicht einer Flüssigkeitssäule, deren Grundfläche den gleichen Flächeninhalt hat, wie die gedrückte Wand, und deren Höhe so groß ist, als die Tiefe des Schwerpunkts der Wand unter dem Spiegel der Flüssigkeit.

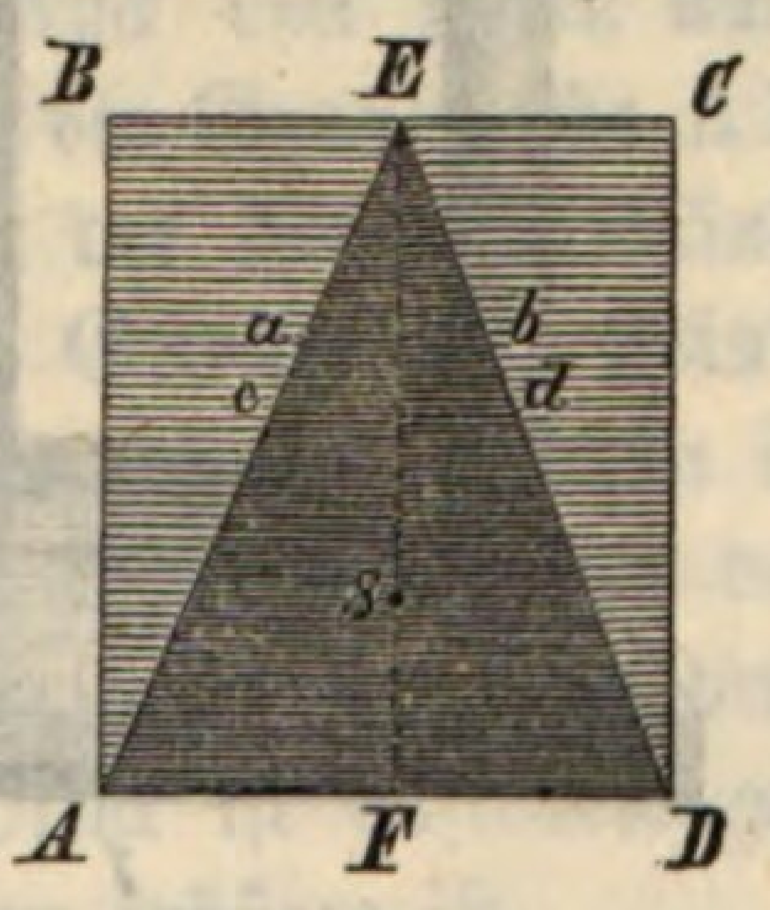
Haben wir also z. B. ein Gefäß von der Gestalt eines Würfels, das ganz mit Wasser gefüllt ist, so ist der Druck auf jede der vier Wände, wenn die Seite des Würfels 3 Fuß, eine Würfelfläche also 9 Quadr.-Fuß mißt, 9 . $1\frac{1}{2}$. 70 = 945 Pfd.; der Druck auf den Gefäßboden ist nach

dem, was wir früher gefunden haben, 9 . 3 . 70 = 1890 Pfd., also gerade das Doppelte von dem Druck auf eine Seitenwand; der Gesammtdruck auf Boden und Wände endlich beträgt 5670 Pfd.

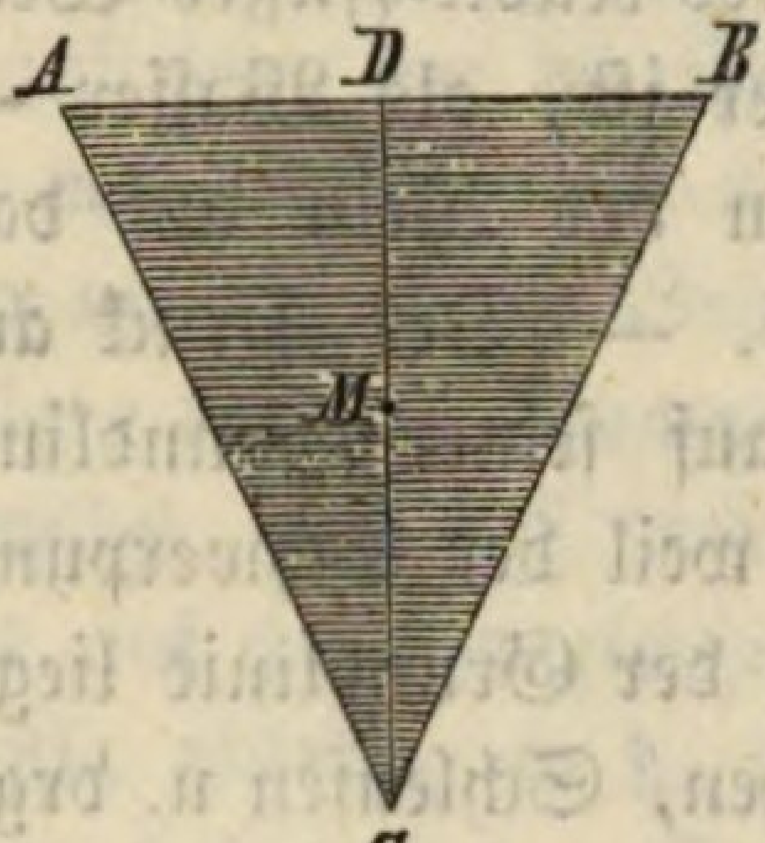
Wenn der Flächeninhalt des Bodenthürchens eines Weinfasses $1\frac{1}{3}$ Quadr.-Fuß, und die Tiefe seines Schwerpunktes unter dem Niveau des Weins 4 Fuß 2 Zoll beträgt, so ist (das Gewicht des Kubik-Fußes Wein — der bald ein wenig leichter, bald etwas schwerer ist, als Wasser — ebenfalls zu 70 Pfd. angenommen) der Druck, den der Wein auf das Thürchen ausübt, gleich $1\frac{1}{3} \cdot 4\frac{1}{5} \cdot 70 = 392$ Pfd. — Der Druck auf eine Dreiecksfläche ist größer, wenn das Dreieck auf seiner Grundlinie ruht, als wenn seine Spitze nach unten gekehrt ist, weil der Schwerpunkt des Dreiecks um ein Drittel seiner Höhe näher bei der Grundlinie liegt, als bei der Spitze. — Beim Bau von Wasserdämmen, Schleusen u. drgl. hat man in der Weise auf den mit der Tiefe zunehmenden Druck des Wassers Rücksicht zu nehmen, daß man die tiefer unter dem Wasserspiegel liegenden Theile derselben auch verhältnißmäßig dicker oder stärker macht. Ebenso müssen bei großen Röhrenleitungen die einzelnen Stücke um so stärker sein, je tiefer sie liegen.

Nach den bisherigen Betrachtungen kann der Gesammtdruck auf eine Gefäßwand als die Resultante der Drücke auf die einzelnen Flächenelemente angesehen werden. Der Angriffspunkt dieser Resultante, d. h. derjenige Punkt, in welchem ein ihr gleicher Gegendruck geleistet werden muß, wenn dem Druck des Wassers auf eine gegebene Fläche das Gleichgewicht gehalten werden soll, heißt der **Mittelpunkt des Drucks**.

Bei einem beliebigen Parallelogramm, dessen obere Seite bis an das Niveau des Wassers reicht, liegt der Mittelpunkt des Drucks um zwei Drittel seiner Höhe unter dem Wasserspiegel auf der Linie, welche die Mitten der obern und untern Seite verbindet. Denken wir uns nämlich auch hier die gedrückte Fläche in eine sehr große Anzahl Querstreifen zerschnitten, und den Druck, den jeder einzelne Streifen auszuhalten hat, in dessen Halbirungspunkt vereinigt, so haben wir auf der Linie EF eine Reihe von Druckkräften, welche von oben nach unten stetig, d. h. proportinal der Tiefe der Streifen unter dem Niveau BC, zunehmen, und wir können daher das Wachsen des Drucks durch das Dreieck AED vorstellen, in welchem die Parallellinien ab, cd 2c. die verhältnißmäßige Größe der entsprechenden Druckkräfte angeben. Sollen wir nun den Angriffspunkt der Resultante aller dieser Kräfte angeben, so sind wir im gleichen Fall, wie bei der Bestimmung des Schwerpunkts eines gleichen **schweren** Dreiecks,

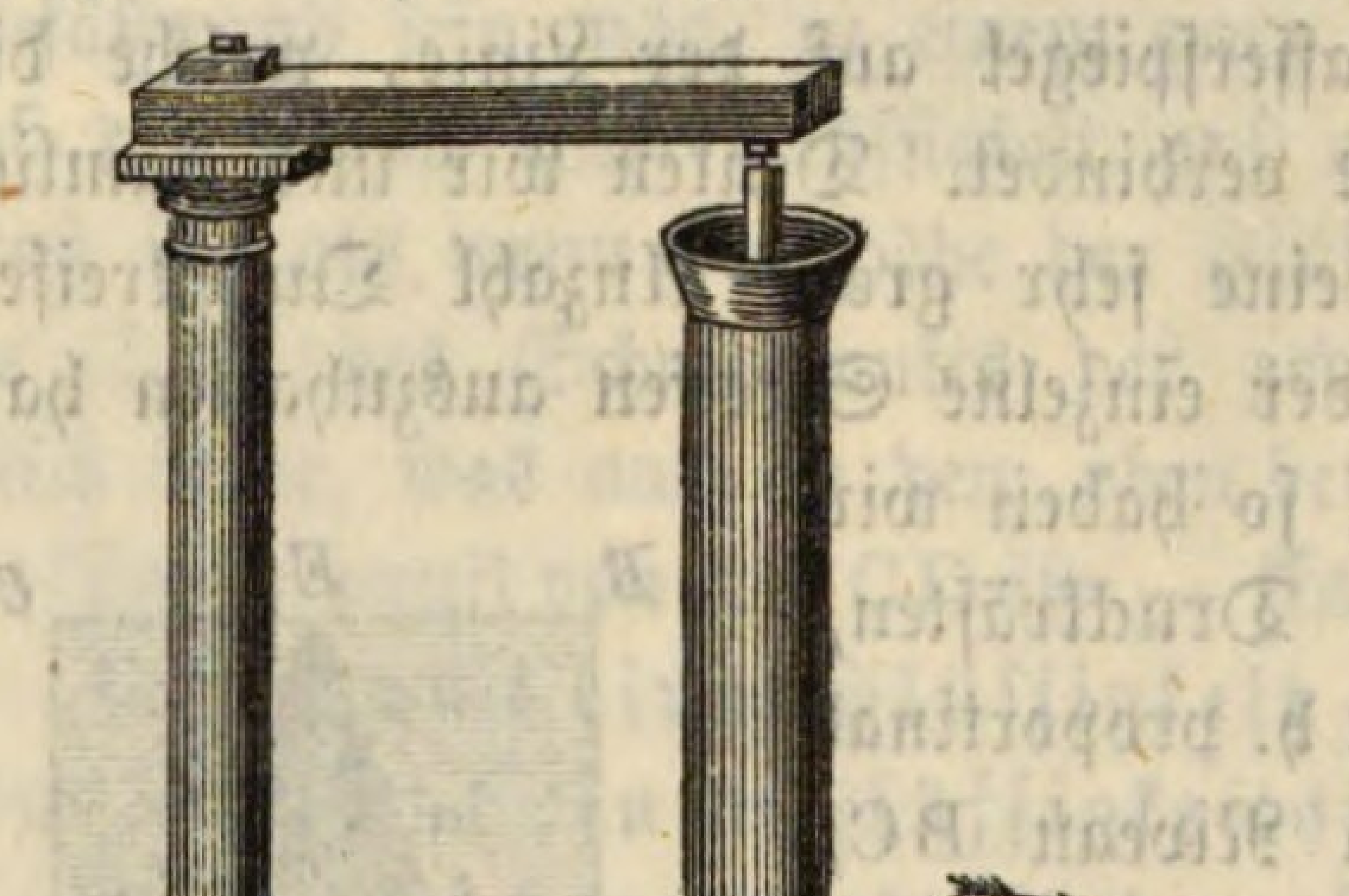


da auch die Gewichte der Streifen a b, c d ꝛc. eines solchen Dreiecks mit der Länge dieser Streifen zunehmen. Der Mittelpunkt des Drucks für das Parallelogramm ABCD muß daher mit dem Schwerpunkt S des Dreiecks AED zusammenfallen, der nach der Lehre vom Schwerpunkt um ein Drittel der Höhe von F und um zwei Drittel von E absteht. —

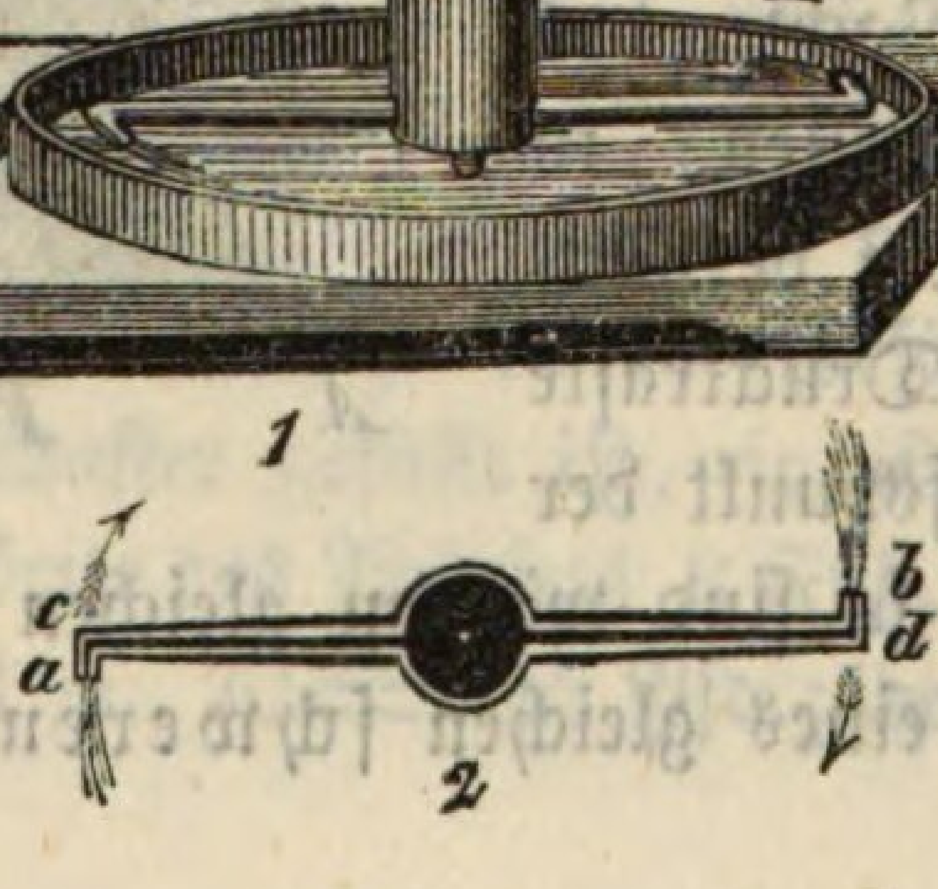


Der Druck auf die einzelnen Streifen eines Dreiecks ABC, dessen Spitze C nach unten gekehrt ist und dessen Grundlinie AB im Wasserspiegel liegt, ist überall gleich groß, weil die Länge und zugleich der Flächeninhalt der Streifen von oben nach unten in demselben Verhältniß abnimmt, in welchem die Höhe der darüber stehenden Wassersäule wächst. Denken wir uns auch hier wieder diese unter sich gleichen Druckkräfte in der Linie DC vereinigt, welche alle Querstreifen halbirt, so erkennen wir leicht, daß der Mittelpunkt des Drucks M in die Mitte dieser Linie fallen muß.

Es ist oben (S. 18) gesagt worden, daß der horizontale Druck des Wassers auf die verschiedenen Theile der Gefäßwände für sich im Gleichgewicht ist, indem der nach der einen Seite hin ausgeübte horizontale Druck durch einen ihm gleichen und entgegengesetzten nach der andern Seite hin aufgehoben wird. Heben wir aber diesen Druck einseitig auf, indem wir an einem Theil der Gefäßwand eine Oeffnung anbringen, so ist die nothwendige Folge die, daß, während hier das Wasser ausfließt, der Druck nach der entgegengesetzten Seite das Uebergewicht gewinnt, und demgemäß das Gefäß nach dieser Seite hin umzuwerfen strebt, und auch wirklich umwirft, wenn die Stabilität desselben nicht groß genug ist.



1



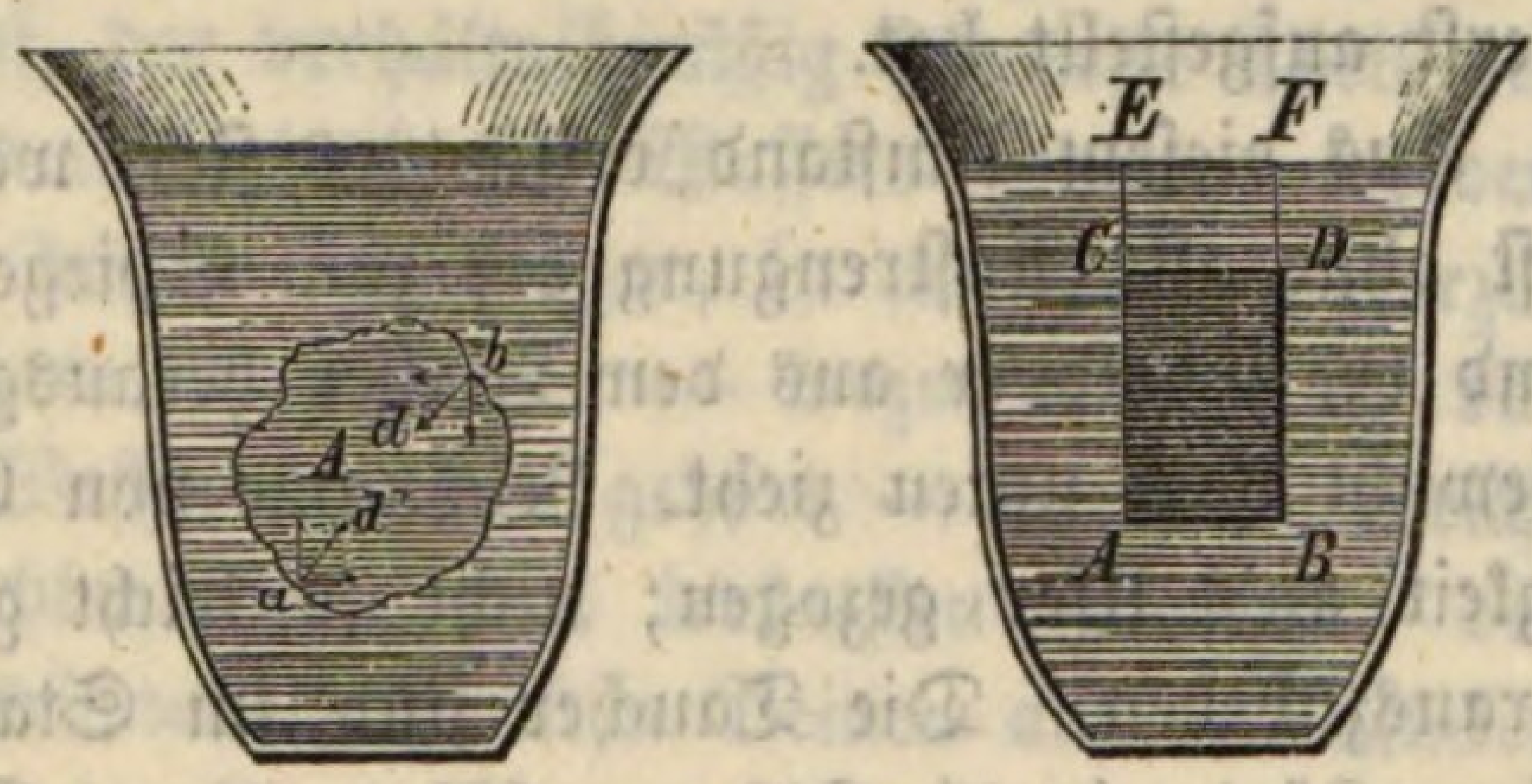
2

Hierauf beruht das nach seinem Erfinder genannte **Segner'sche Wasserrad.** Im Kleinen ausgeführt findet man es häufig in physikalischen Kabinetten; es besteht alsdann gewöhnlich aus einem hohlen Cylinder (Fig. 1), der sich um eine senkrechte Axe drehen kann, und unten mit zwei hohlen Armen in Verbindung steht, die auf einer Seite mit Oeffnungen für den Ausfluß des Wassers versehen sind. Fig. 2 stellt diese Arme von oben gesehen vor. Verschließt man die Oeffnungen a und b, und füllt

das Gefäß mit Wasser, so ist der Druck allseitig im Gleichgewicht, und das Gefäß bleibt in Ruhe; sobald aber durch Oeffnen der Ansätze a c und b d der Druck in den Punkten a und b aufgehoben wird, so bewirkt der einseitige Druck auf c und d eine Drehung des Gefässes in einem und demselben Sinne, wie dies durch die Pfeile angedeutet ist.

Druck der Flüssigkeiten auf eingetauchte Körper.

Ein in eine Flüssigkeit eingetauchter Körper erleidet an allen Punkten seiner Oberfläche von den angrenzenden Theilchen der Flüssigkeit einen Druck gleich demjenigen, unter welchem diese Theilchen selbst stehen. Tiefer liegende Punkte desselben werden also stärker gedrückt, als höher liegende. Dieser Druck ist überall nach dem Innern des Körpers gerichtet, und steht normal auf den gedrückten Flächenelementen. Zerlegen wir die einzelnen Drücke in horizontale und vertikale Composanten, wie wir dies auch beim Druck auf die Gefäßwände gethan haben, so erhalten wir eine Reihe horizontaler Composanten, die, wie dort, für sich im Gleichgewicht sind, und eine Reihe vertikaler Composanten, die theils nach unten, wie in der Figur links die vertikale Composante des Drucks d, theils nach oben, wie die vertikale Composante des Drucks d′, gerichtet sind.



Bei einfachen Gestalten lassen sich diese vertikalen Composanten leicht bestimmen, und daraus der Gesammtvertikaldruck ableiten. Das rechts abgebildete, rechtwinklige Prisma ABDC, dessen Grundflächen eine horizontale Lage haben, wird von der umgebenden Flüssigkeit an den Seitenflächen nur in horizontaler Richtung gedrückt; seine untere Grundfläche erleidet einen Druck von unten nach oben gleich dem Gewicht einer Flüssigkeitssäule von der Grundfläche AB und von der Höhe AE, d. h. gleich dem Gewicht der Flüssigkeitssäule ABFE; seine obere Grundfläche wird durch das Gewicht der Säule CDFE abwärts gedrückt: der Gesammtdruck also, den dieses Prisma in vertikaler Richtung erleidet, ist gleich dem Unterschied der Gewichte der Flüssigkeitssäulen ABFE und CDFE, oder was dasselbe ist, gleich dem Gewicht einer Flüssigkeitssäule ABDC. Dieser Druck ist aufwärts gerichtet, da der Druck auf die untere Grundfläche der größere ist.

Wir sehen hieraus, daß der eingetauchte Körper mit einer Kraft nach oben getrieben wird, die dem Gewicht der von ihm verdrängten Flüssig-

keit gleich kommt. Dasselbe gilt auch für alle andern, beliebig gestalteten Körper. Um uns von der allgemeinen Gültigkeit dieses Erfundes Rechenschaft zu geben, denken wir uns den Raum, den der eingetauchte Körper einnimmt, auch von der Flüssigkeit erfüllt. Dieser abgegrenzt gedachte Flüssigkeitskörper ist nothwendig für sich im Gleichgewicht, wie die übrige Flüssigkeit, und es muß daher die Summe der vertikalen Druckkräfte, welche von den Nachbartheilchen der Flüssigkeit ausgehen, gleich sein der Resultante der an demselben wirkenden Schwerkräfte, d. i. gleich seinem Gewicht. Wir stellen daher das allgemeine Gesetz auf:

Ein in eine Flüssigkeit eingetauchter Körper wird von dieser mit einer Kraft aufwärts getrieben, welche so groß ist, als das Gewicht der von demselben verdrängten Flüssigkeit.

Oder:

Ein in eine Flüssigkeit eingetauchter Körper verliert genau so viel an seinem Gewicht, als die Flüssigkeit wiegt, deren Raum er einnimmt.

In letzterer Form ist dieser Satz als archimedisches Prinzip bekannt, weil ihn Archimedes von Syrakus (um das Jahr 250 v. Chr.) zuerst aufgestellt hat.

Aus diesem Umstand erklärt es sich, warum ein voller Eimer Wasser fast ohne alle Anstrengung bis zum Spiegel gehoben werden kann, während er, sobald er aus dem Wasser herausgetreten ist, mit seinem ganzen Gewicht nach unten zieht. Leichname von Ertrunkenen werden mit Leichtigkeit an's Ufer gezogen; nicht so leicht geht es, sie aus dem Wasser herauszuheben. Die Taucher sind im Stande, am Grund des Meeres Gegenstände in die Höhe zu heben, deren Gewicht außerhalb des Wassers ihre Kraft weit übersteigen würde.

Manche Körper verlieren im Wasser oder in andern Flüssigkeiten ihr Gewicht ganz, wenn es nämlich so groß oder kleiner ist, als der auf sie ausgeübte aufwärts gehende Druck der Flüssigkeit; in diesem Falle schwimmen die Körper in oder auf der Flüssigkeit. In dieser Beziehung folgern wir aus dem archimedischen Prinzip die folgenden Sätze:

1) Ein untergetauchter Körper, der schwerer ist, als die von ihm verdrängte Flüssigkeit, sinkt zu Boden.

2) Ein untergetauchter Körper, der so viel wiegt, als die von ihm verdrängte Flüssigkeit, ist in der Flüssigkeit an jeder Stelle im Gleichgewicht; der Körper schwimmt **in** der Flüssigkeit.

3) Ein Körper, der leichter ist, als ein gleich großes Volumen einer Flüssigkeit, taucht in dieser nur so tief unter, daß das Gewicht der von ihm verdrängten Flüssigkeit seinem

eigenen ganzen Gewichte gleichkommt; der Körper schwimmt auf der Flüssigkeit.

Die Fische sind im Wasser überall im Gleichgewicht; sie können sich daher mittelst der Floßen, die ihnen als Ruder dienen, leicht nach allen Richtungen hin bewegen. Zugleich ist ihnen in der Schwimmblase, die sie zwischen den Rippen willkürlich mehr oder weniger zusammendrücken können, ein Mittel gegeben, das Volumen ihres Leibes und damit zugleich den aufwärtsgehenden Druck des Wassers zu verringern oder zu vergrößern, und dadurch bald tiefer unterzutauchen, bald sich dem Wasserspiegel zu nähern.

Auch das Gewicht der Menschen ist nahezu dem des Wassers von gleichgroßem Volumen gleich; die meisten Menschen sind leichter, wenige schwerer, als das Wasser. Der Kopf und die Gliedmaßen, die zum größten Theil aus Knochen bestehen, sind verhältnißmäßig schwerer, als der Rumpf; daher schwimmen wohlbeleibte Personen viel leichter, als magere, die nur wenig Fleisch und Fett an sich haben. Wenn dem ungeachtet das künstliche Schwimmen manchen Leuten Mühe macht, und in der Regel erst durch längere Uebung erlernt wird, so hat dieß seinen Grund einestheils darin, daß der Kopf, der verhältnißmäßig schwerste Theil des Körpers, behufs des Athmens außerhalb des Wassers gehalten werden muß, und anderntheils darin, daß die Anfänger, in der Angst unterzusinken, gewöhnlich ganz verkehrte Bewegungen — wozu namentlich das Erheben der Arme über die Wasseroberfläche gehört — machen, welche das Untersinken geradezu beschleunigen. Am leichtesten schwimmt der Mensch, wenn er sich mit auseinandergestreckten Beinen auf den Rücken legt und den Kopf soweit untertaucht, daß nur noch Nase und Mund aus dem Wasser hervorragen; in dieser Lage muß Jeder, der nicht aus Haut und Knochen allein besteht, vom Wasser getragen werden, und es gehört daher zum Schwimmen auf dem Rücken nichts, als der Muth, einer nicht vorhandenen Gefahr zu trotzen. — Die meisten Landthiere haben den Vortheil, daß sie in der gewöhnlichen, aufrechten Stellung die Mund- und Nasenöffnungen auch dann frei halten können, wenn der ganze übrige Theil des Kopfes untergetaucht ist.

Man kann sich das Schwimmen dadurch erleichtern, daß man sich mit leichten Körpern von großem Volumen, wie Kork, Luftkissen 2c. umgibt. Der Körper erhält dadurch neben einer unbedeutenden Gewichtsvermehrung einen beträchtlichen Zuwachs an Volumen, demzufolge auch der aufwärtsgehende Druck des Wassers wächst; hierauf beruht die Anlegung von Schwimmpanzern, Schwimmjacken, Schwimmblasen u. s. w.

Wenn ein Mensch ertrinkt, so füllt sich sein Körper allmälig mit Wasser; er wird schwerer und sinkt zu Boden. Sobald die Fäulniß

eintritt, entwickeln sich durch Zersetzung im Innern Gase, welche den Leichnam ausdehnen und demselben ohne Vermehrung seines Gewichts ein größeres Volumen geben. Daher sehen wir die Leichen Ertrunkener nach etlichen Tagen wieder auf die Oberfläche kommen. Bei fortgesetzter Fäulniß bricht der Leib an einzelnen Stellen auf, die Gase treten aus, Wasser tritt ein, der Leichnam wird schwerer und sinkt abermals zu Boden, um nie wieder aufzutauchen.

Wer hat nicht schon auf Märkten und Volksfesten die kleinen kartesianischen Teufel gesehen, wie sie in hohen, gläsernen Cylindern oder Flaschen im Wasser auf- und niedersteigend auf Geheiß der Marktschreier dem lieben Volk die Zukunft vorhersagen müssen! — Es sind dieß hohle, gläserne, mit Hörnern, Schwanz ꝛc. versehene Puppen, die mit Luft gefüllt sind und nur in den untersten Theilen etwas Wasser enthalten, welches als Ballast wirkend ihnen beim Schwimmen eine aufrechte Stellung gibt und so bemessen ist, daß die Teufelchen, unmerklich leichter als das Wasser, kaum über den Wasserspiegel hervorragen. Die Gefäße, in welchen sie schwimmen, sind oben durch eine Blase oder eine Kautschukplatte luftdicht verschlossen. Uebt man daher auf diese einen Druck aus, so pflanzt sich derselbe durch die Flüssigkeit fort, was zur Folge hat, daß die Teufelchen im Wasser niedersinken, indem durch ihren offenen Schwanz unter Zusammendrückung der in denselben enthaltenen Luft eine kleine Menge Wasser gepreßt und dadurch ihr Gewicht vermehrt wird. Wird der Druck aufgehoben, so dehnt sich die gepreßte Luft aus, treibt das eingetretene Wasser wieder aus den Puppen aus, und diese erheben sich zu ihrem früheren Stand. Der Schwanz ist seitwärts gebogen, weßhalb beim Ein- und Austreten des Wassers ein einseitiger Druck entsteht, der den Figürchen eine drehende Bewegung ertheilt.

Wie die festen Körper von Flüssigkeiten, welche schwerer sind, als sie selbst — Holz von Wasser, Eisen von Quecksilber ꝛc. — getragen werden, so schwimmen auch leichtere Flüssigkeiten auf schwereren, wenn sie sich nicht in einander auflösen, so Oel auf Wasser, Wasser auf Quecksilber u. s. w.

Körper, die schwerer sind, als eine Flüssigkeit, sinken in dieser unter. Dennoch können auch die schwersten Körper dahin gebracht werden, daß sie auf einer beliebigen Flüssigkeit schwimmen, indem man ihnen eine ausgehöhlte oder ausgebauchte Form gibt, wodurch man erreicht, daß sie, auf die Flüssigkeit gelegt, ein weit größeres Volumen derselben verdrängen, als das des massiven Theils dieser Formen in Wirklichkeit beträgt. Aus diesem Grund schwimmen auf dem Wasser hohle Metallkugeln, Uhrgläser, leere Flaschen, Schiffe aller Art u. s. w.

Ein Schiff sinkt um so tiefer ein, je größer seine Belastung ist;

denn immer muß das Gewicht des verdrängten Wasservolumens dem Gewicht des leeren Schiffs sammt dem der Belastung gleich sein. — Um ein Schiff zu eichen, d. h. zu bestimmen, wie groß seine Tragkraft ist, hat man nur den Kubikinhalt desjenigen Theils desselben zu berechnen, der zwischen dem Punkt, bis zu welchem das leere Schiff einsinkt, und demjenigen liegt, bis zu welchem das belastete Schiff ohne Gefahr höchstens einsinken darf, und nach diesem das Gewicht der verdrängten Wassermasse zu bestimmen. Es sei z. B. der Abstand zwischen dem niedrigsten und dem höchsten Punkt des Schiffes, den der Wasserspiegel bespülen kann, 10 Fuß, und der mittlere Querschnitt dieses Theils des Schiffes 1000 Quadratfuß; so beträgt der Kubikinhalt des dazwischen liegenden Raumes 10000 Kubikfuß, und das Gewicht der von demselben verdrängten Wassermasse 70 . 10000 = 700000 Pfd. (Diese Berechnung gilt für süßes Wasser; der Kubikfuß Meerwasser wiegt ungefähr 72 Pfd., also 2 Pfd. mehr, als jenes.) Das Schiff kann also ohne Gefahr mit 7000 Entr. oder 350 Tonnen*) belastet werden. Eine Vermehrung der Belastung um 1000 Pfd. macht, daß ein Schiff von diesem Querschnitt um 1/70 Fuß oder nicht ganz 1½ Linien tiefer einsinkt.

Hieraus ist leicht zu ermessen, daß sehr große Schiffe mit ungeheuren Lasten beladen werden können. Wer hat nicht schon von dem Riesenschiff gelesen, das König Hiero von Syrakus unter der Leitung des Archimedes durch den Korinther Archias erbauen ließ, und das neben Hunderten von Gemächern noch Gärten mit Spaziergängen, Fischteiche, Bäder, Uebungsplätze für das kleine Heer, das es aufzunehmen bestimmt war, Ställe u. s. w. in sich faßte. Die Obelisken der Egypter wurden mittelst großer Schiffe von den Steinbrüchen, wo sie zugehauen wurden, an den Ort ihrer Bestimmung gebracht. Sollte nämlich ein Obelisk, der im Steinbruch fertig dalag, fortgeschafft werden, so wurde unter ihm durch bis zu seinem Bestimmungsort ein Kanal gegraben, der sich beim Austreten des Nils mit Wasser füllte. Sofort wurden große Schiffe so stark mit Steinen belastet, daß sie unter den quer über den Kanal liegenden und auf beiden Ufern ruhenden Obelisken gestellt werden konnten. Nun wurde der Ballast ausgeladen, die Schiffe erhoben sich im Wasser, nahmen den gewaltigen Riesen auf die Schulter und trugen ihn, wohin man wollte. Beim Abladen verfuhr man umgekehrt: man füllte die Schiffsräume mit Steinen, bis die Schiffe so tief untersanken, daß der Obelisk wieder auf den Ufern des Kanals aufzuliegen kam.

Manchmal gelingt es, stählerne Nähnadeln, die man zuvor zwischen

---

*) Eine Tonne gleich 2000 Pfd.; zwei Tonnen gleich einer Schiffslast.

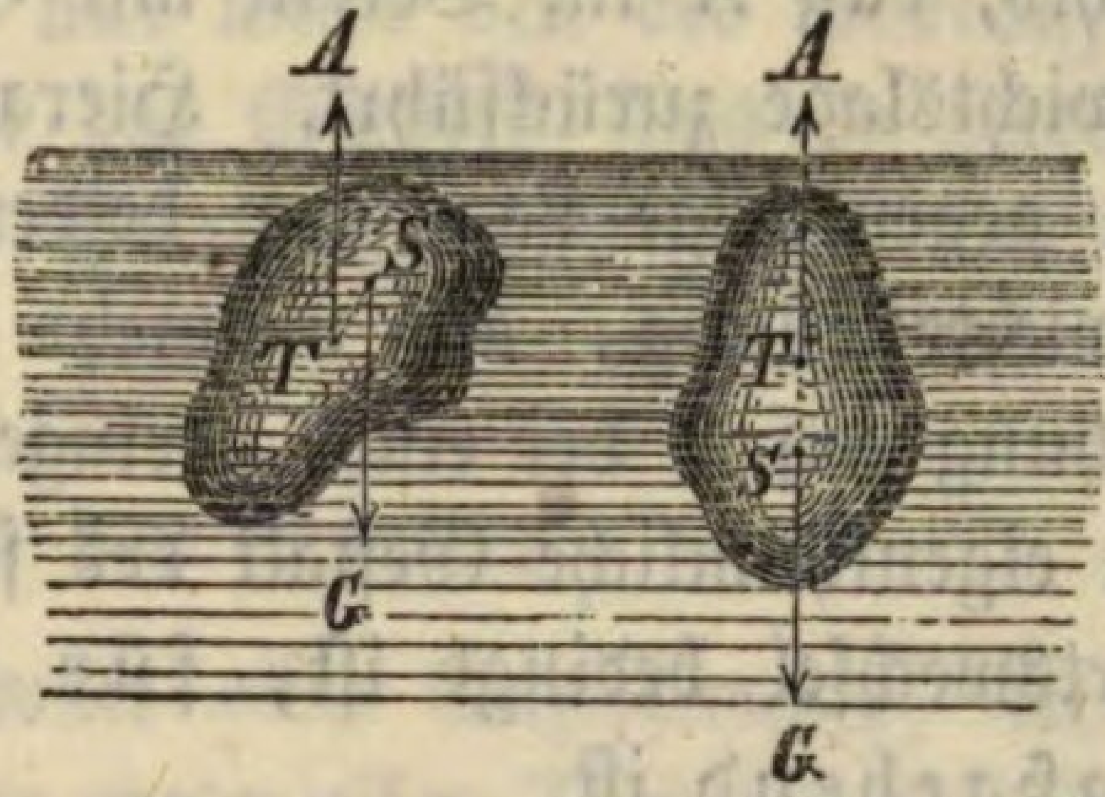
den Fingern gerieben hat, auf dem Wasser zum Schwimmen zu bringen, während sie doch weit schwerer sind, als Wasser von gleichem Volumen. Diese mit den hier aufgestellten Grundsätzen scheinbar im Widerspruch stehende Erscheinung hat darin ihren Grund, daß die Nadel, welche in Folge des Reibens zwischen den Fingern mit einer dünnen Fettschicht überzogen wird, vom Wasser nicht benetzt wird; daß daher dieses ringsum von der Nadel zurückweicht und gleichsam einen Graben bildet, ähnlich wie Quecksilber in der Nähe einer gläsernen Wand; daß endlich demzufolge die Nadel ein Volumen Wasser verdrängt, das ihr eigenes weit übertrifft, und dessen Gewicht unter günstigen Umständen dem der Nadel gleichkommen oder es gar übertreffen kann.

Ist ein schwimmender Körper in Ruhe, so sind die an ihm thätigen Kräfte, nämlich sein Gewicht und der aufwärtsgehende Druck der Flüssigkeit, der Auftrieb, im Gleichgewicht. Wird das Gleichgewicht des schwimmenden Körpers gestört, so kehrt er entweder von selbst wieder in die Gleichgewichtslage zurück, oder er entfernt sich immer weiter davon und schlägt um, oder er bleibt endlich auch in jeder neuen Lage im Gleichgewicht. Im ersten Fall heißt sein Gleichgewichtszustand sicher oder stabil, im zweiten Fall unsicher oder labil, und im dritten Fall indifferent, d. h. es ist für sein Gleichgewicht gleichgültig, in welcher Lage er sich befindet.

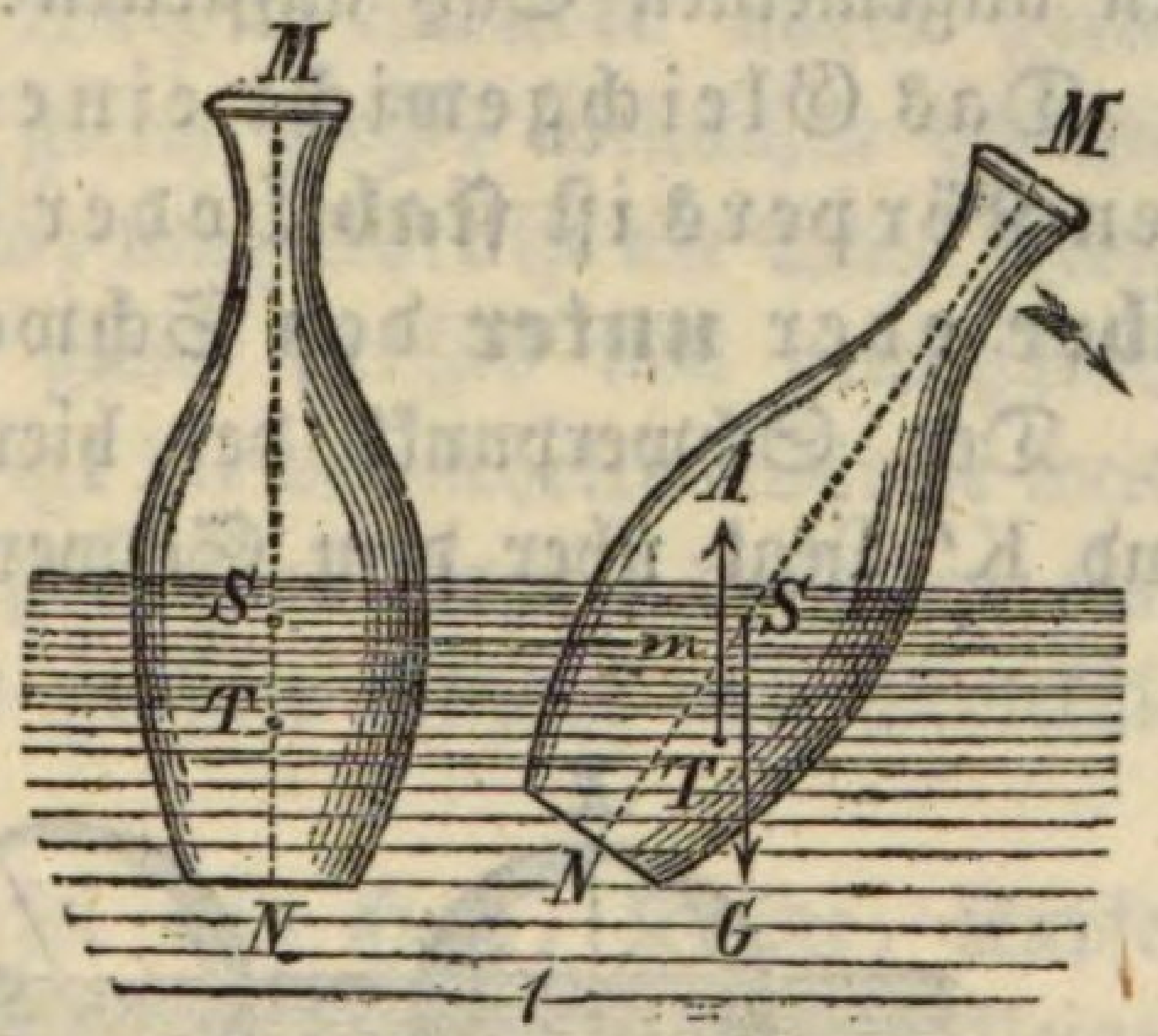
Forschen wir nun nach den Bedingungen, auf welchen die Sicherheit des Gleichgewichts eines schwimmenden Körpers beruht. — Wenn ein schwimmender Körper im Gleichgewicht ist, so müssen die an ihm thätigen, gleichen und entgegengesetzten Vertikalkräfte, Gewicht und Auftrieb, nach einer und derselben geraden Linie wirken, d. h. ihre Angriffspunkte müssen in einer Vertikallinie liegen. Der Angriffspunkt des Gewichts des schwimmenden Körpers ist aber sein Schwerpunkt, und der Angriffspunkt des Auftriebs, wie sich leicht einsehen läßt, der Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeitsmasse; es müssen also in der Gleichgewichtslage des Körpers diese beiden Schwerpunkte senkrecht über einander stehen. Die Verbindungslinie dieser beiden Punkte in der Gleichgewichtslage heißt die Schwimmaxe.

Schwimmt ein Körper im Wasser und ist seine Masse durchaus gleich dicht oder homogen, so fallen die beiden Schwerpunkte in einen Punkt zusammen; wir haben alsdann zwei gleiche und entgegengesetzte Kräfte, die in einem Punkt angreifen, und die folglich im Gleichgewicht sind: der Körper ist in jeder Lage in Ruhe, — sein Gleichgewicht ist indifferent. Ist der Körper nicht homogen, so fallen im Allgemeinen die zwei Angriffspunkte nicht zusammen, und sie müssen daher in der Gleichgewichtslage senkrecht über einander stehen. Da aber bei einem ganz untergetauchten Körper die gegenseitige Lage der beiden Schwerpunkte im Körper

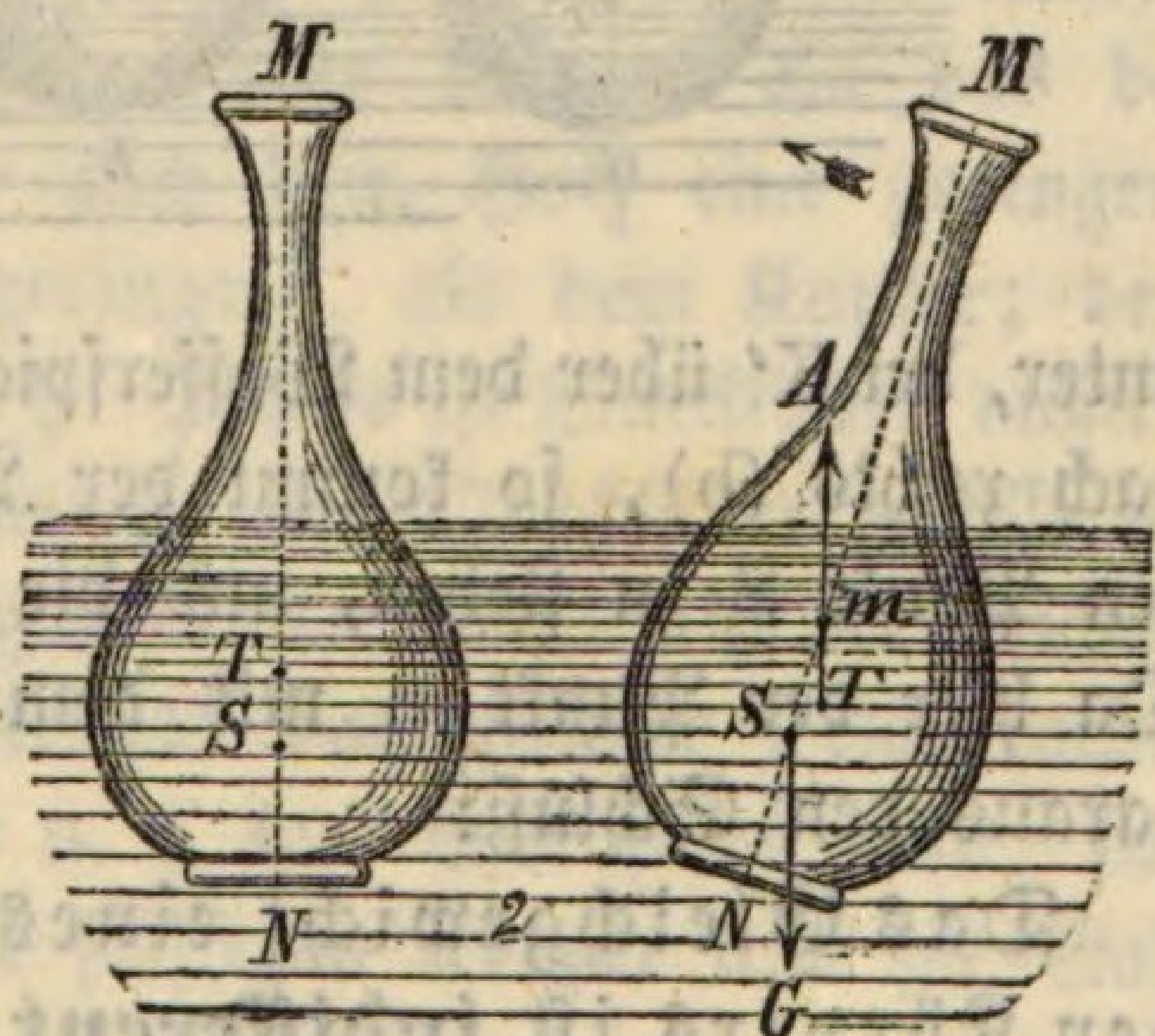
selbst eine unveränderliche ist, so kann, wie aus der beigefügten Zeichnung zu erkennen ist, der Körper nur dann **stabil** schwimmen, wenn sein Schwerpunkt S **unter** den Angriffspunkt T des Auftriebs A zu stehen kommt.

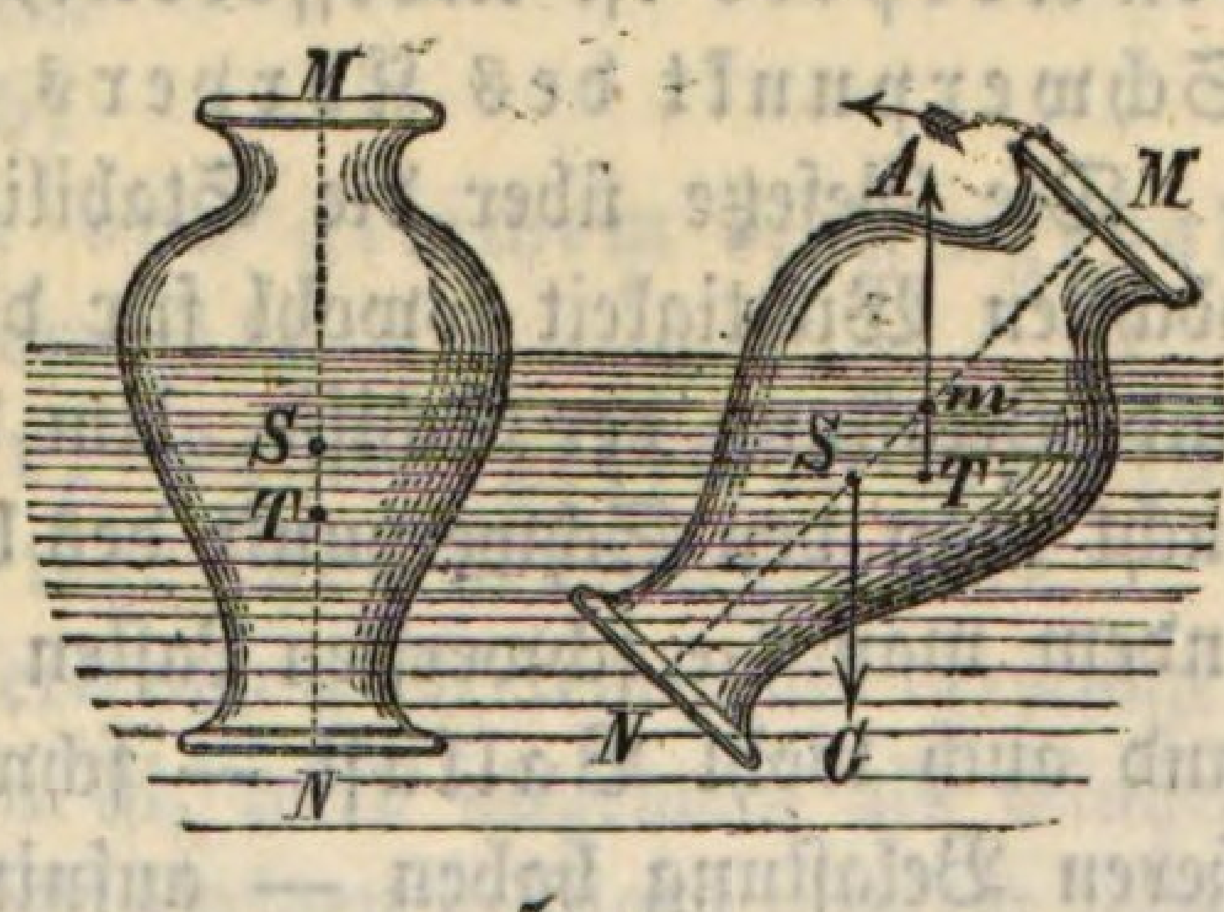


Bei Körpern, welche **auf** dem Wasser schwimmen, verhält sich die Sache etwas anders: der Schwerpunkt S des schwimmenden Körpers verändert seine Lage **im Körper** nicht, so lange die Masse des Körpers im Innern nicht verschoben wird, wie dies z. B. bei Gefässen der Fall ist, die nur zum Theil mit Flüssigkeit gefüllt sind; dagegen wechselt der Schwerpunkt T der verdrängten Flüssigkeit im Allgemeinen seine Lage innerhalb des schwimmenden Körpers und damit zugleich in Beziehung auf den Schwerpunkt S, wenn sich, wie dies bei den hier abgebildeten Gefässen der Fall ist, mit der veränderten Stellung des Körpers zugleich die Gestalt der verdrängten Wassermasse ändert.



Bei der Flasche 1 liegt der Punkt S höher als T; bringt man sie in eine schiefe Lage, so sehen wir aus der Zeichnung, daß sie durch die Kräfte G (Gewicht der Flasche) und A (Auftrieb) noch weiter von ihrer Gleichgewichtslage entfernt wird; sie schlägt ganz um und ihr Gleichgewicht war daher **labil**. Bei der Flasche 2 liegt der Punkt S tiefer als T; neigt man sie auf die Seite, so wird sie, wie ein Blick auf die Stellung rechts zu erkennen gibt, durch die Kräfte G und A im Sinne des Pfeils wieder in ihre Gleichgewichtslage zurückgeführt: sie schwimmt also **stabil**. Bei der Vase 3 endlich liegt der Schwerpunkt wieder **über** dem Angriffspunkt des Auftriebs; durch eine Drehung nach rechts rückt aber der Punkt T in Folge der eigenthümlichen Gestalt des Gefässes ebenfalls so weit nach



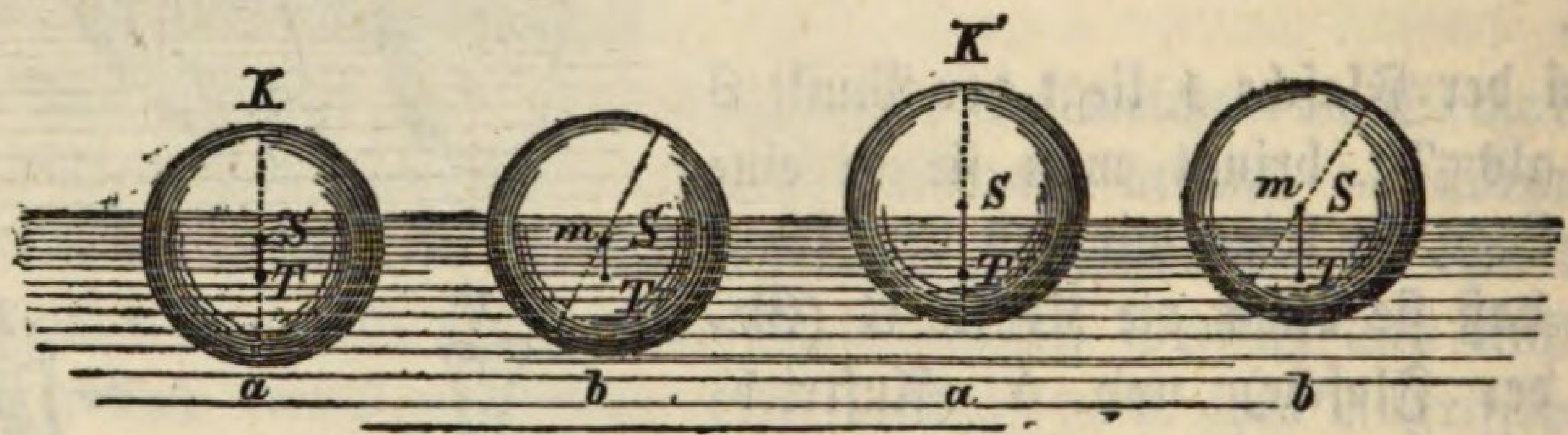


rechts, daß A im Verein mit G dieses nothwendig wieder in die Gleichgewichtslage zurückführt. Hieraus ergibt sich nun klar, daß nicht sowohl die gegenseitige Lage der beiden Schwerpunkte S und T in der Gleichgewichtsstellung, als vielmehr der Ortswechsel des Punkts T in Beziehung auf S bei einer geringen Störung des Gleichgewichts, und damit die eigenthümliche Gestalt des schwimmenden Körpers, durch welche jener Ortswechsel bedingt ist, für die Sicherheit des Gleichgewichts maßgebend ist.

Einen sichern Anhaltspunkt gewinnen wir, wenn wir den Punkt m in's Auge fassen, in welchem die Richtung des Auftriebs die Schwimmaxe MN schneidet, und welchem man den Namen Metacentrum gegeben hat. Liegt derselbe über dem Punkt S, so ist das Gleichgewicht stabil, liegt er unter demselben, so ist es labil. Wir können daher den allgemeinen Satz aufstellen:

Das Gleichgewicht eines auf einer Flüssigkeit schwimmenden Körpers ist **stabil** oder **labil**, je nachdem das Metacentrum **über** oder **unter** den Schwerpunkt desselben zu stehen kommt.

Der Schwerpunkt der hier abgebildeten schwimmenden Kugeln K und K' liegt über dem Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit, bei K



unter, bei K' über dem Wasserspiegel. Geben wir den Kugeln eine Drehung nach rechts (b), so kommt der Punkt T wiederum genau senkrecht unter den Punkt S zu stehen, und die Kugeln sind abermals im Gleichgewicht. Da hier der Punkt m mit dem Punkt S zusammenfällt, so ziehen wir daraus den Schluß:

Das Gleichgewicht eines auf einer Flüssigkeit schwimmenden Körpers ist **indifferent,** wenn das Metacentrum mit dem Schwerpunkt des Körpers zusammenfällt.

Die Gesetze über die Stabilität schwimmender Körper sind von der höchsten Wichtigkeit sowohl für die Bauart, als für die Art der Ladung und Belastung der Schiffe. Um das Gleichgewicht recht stabil zu machen, sucht man den Schwerpunkt des beladenen Schiffes möglichst tief zu stellen, indem man die schwersten Lasten in die untersten Räume desselben bringt und auch wohl Ballast — schwere Körper, die nur den Zweck der größeren Belastung haben — aufnimmt. Da es aber nicht immer möglich

ist, den Schwerpunkt des Schiffes auch nur unter den des verdrängten Wassers zu verlegen, so muß die Form des Schiffes stets so gewählt werden, daß das Metacentrum bei jeder Belastung über den Schwerpunkt fällt.

Das spezifische Gewicht der Körper.

Das Gewicht der Körper ist die Summe aller Anziehungen, welche die Schwerkraft der Erde auf die einzelnen materiellen Theilchen derselben ausübt (Buch I. S. 76); es ist daher natürlich, daß ein Körper um so schwerer ist, je mehr Massentheilchen er enthält, und daß von zwei Körpern von gleichem Volumen derjenige das größere Gewicht hat, bei welchem die größere Masse auf den gleichen Raum zusammengedrängt ist, d. h. welcher die größere Dichte besitzt. Ein Stückchen Eisen oder Kupfer, dessen Moleküle durch Hämmern oder Walzen einander näher gerückt worden sind, ist daher schwerer, als ein gleich großes Stückchen des nicht gehämmerten oder des ungewalzten Metalls; umgekehrt ist ein Stück Metall von hoher Temperatur leichter, als ein gleich großes von gewöhnlicher Temperatur, da dort die Moleküle in Folge der vermehrten Wärme weiter auseinander getreten sind, so daß eine geringere Anzahl derselben einen ebenso großen Raum einnimmt, als eine größere Anzahl von Molekülen im kalten Zustand des Körpers.

Verschaffen wir uns gleichgroße Würfel von Holz, Kreide, Kupfer, Blei u. s. w., so finden wir das Gewicht des hölzernen Würfels kleiner, als das des Würfels von Kreide; dieses wieder kleiner, als das des kupfernen u. s. f.: wir schreiben daher auch dem Holz eine geringere Dichte zu, als der Kreide; dieser eine geringere, als dem Kupfer; dem Kupfer eine geringere als dem Blei u. s. f. Ebenso ist Quecksilber dichter, als Wasser, weil die gleiche Flasche, wenn sie mit Quecksilber gefüllt ist, schwerer wiegt, als wenn sie mit Wasser gefüllt ist. Endlich ist bei gleichem Volumen Schwefelgas schwerer, als Chlorgas von gleicher Temperatur; dieses schwerer, als atmosphärische Luft u. s. w. Wir sehen also, daß nicht allein die festen, sondern auch die flüssigen Körper und die Gase im Allgemeinen verschiedene Dichte haben.

Aus diesen Erläuterungen ergibt sich:

1) Die Dichten zweier Körper von gleichem Raumgehalt verhalten sich gerade wie ihre Gewichte.

2) Die Dichten zweier Körper, welche gleiches Gewicht haben, verhalten sich umgekehrt, wie ihre Raumgehalte.

Die Dichte des chemisch reinen Wassers von 4° Wärme, als derjenigen Temperatur, bei welcher es am dichtesten ist, wird allgemein als Einheit angenommen, und hiernach werden die der übrigen flüssigen und der festen

Körper bestimmt. Für die luftförmigen Körper dient gewöhnlich die Dichte der atmosphärischen Luft, bei 0° Temperatur und bei 28 Zoll Barometerstand, als Einheit.

Das Wasser hat die Dichte 1; ein Körper, der doppelt so dicht ist, oder bei gleichem Raumgehalt doppelt so schwer wiegt, hat eine Dichte gleich 2; ein anderer, der 10mal so dicht ist als Wasser, hat eine Dichte gleich 10 &c.; ein Gas, das bei gleichem Volumen und bei gleicher Temperatur 6mal so schwer wiegt als atmosphärische Luft, hat eine Dichte gleich 6 u. s. f. Diese Zahlen pflegt man das spezifische Gewicht der Körper zu nennen, ein Ausdruck, welcher auf die den einzelnen Stoffen vermöge ihrer besondern Dichte eigenthümliche Schwere hinweisen soll. Das spezifische Gewicht eines Körpers ist also nicht das gewöhnliche, in Centnern, Pfunden, Lothen &c. ausgedrückte, das man im Gegensatz zu jenem auch wohl das absolute Gewicht heißt; sondern es drückt durch eine bloße Zahl aus, wie vielmal ein gewisses Volumen — ein Kubikfuß, Kubikzoll &c. — eines Körpers schwerer ist, als ein ebenso großes Volumen Wasser oder atmosphärische Luft.

Bis daher haben wir nur gleichförmig dichte Körper, d. h. solche, bei denen die Masse überall gleichförmig vertheilt ist, im Auge gehabt.

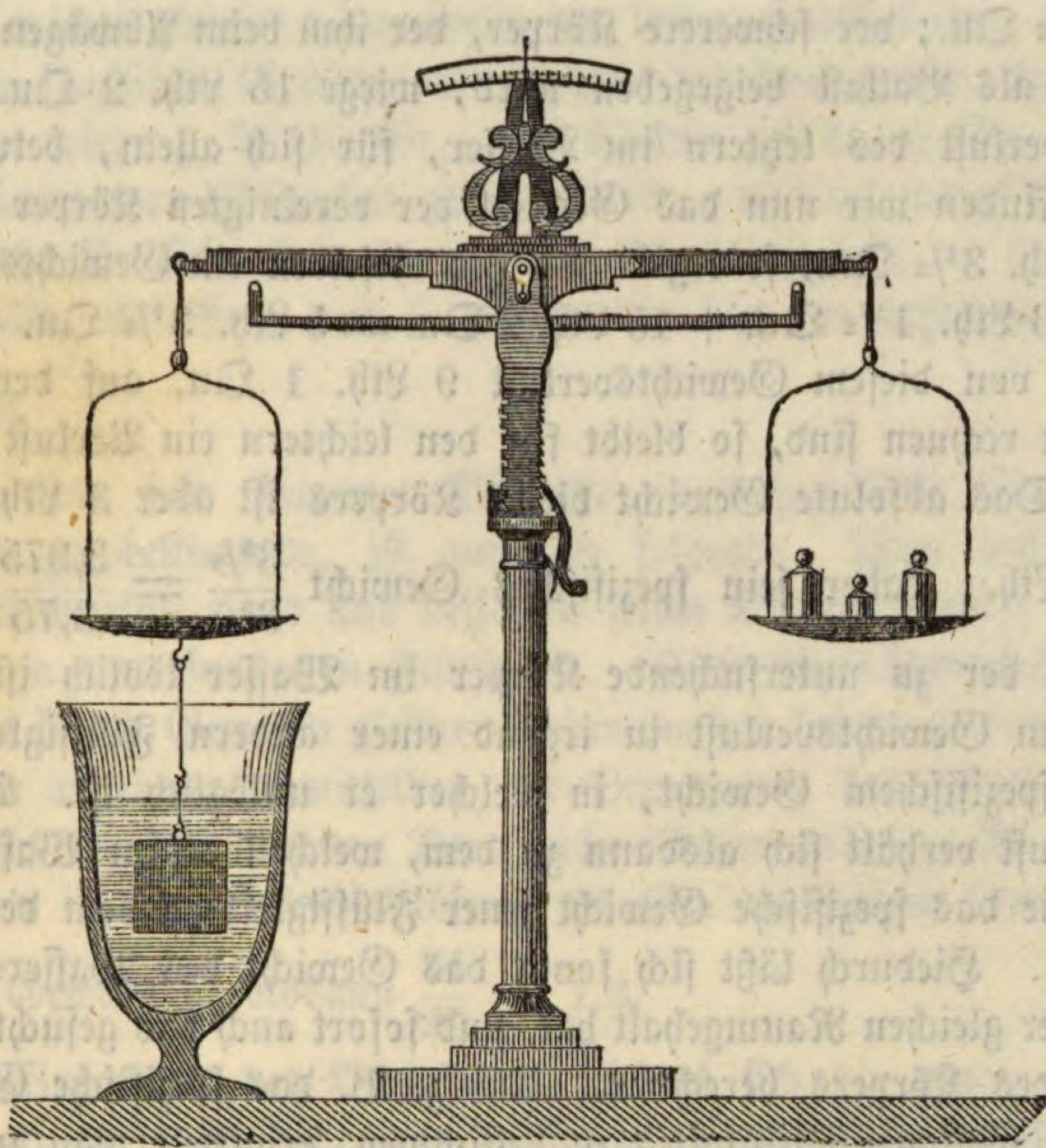
Bei ungleichförmig dichten Körpern, wie z. B. beim Erdkörper, beim menschlichen Leib u. drgl. spricht man von einer mittleren Dichte; man versteht darunter diejenige, welche sie haben würden, wenn bei gleichbleibendem Raumgehalt ihre Bestandtheile gleichförmig gemengt wären.

Wir wollen nun zeigen, wie mit Hülfe des archimedischen Princips das spezifische Gewicht der Körper bestimmt wird. Dabei denken wir uns das Wasser im Zustand seiner größten Dichte bei 4° Wärme, um der Mühe überhoben zu seyn, die Erfunde, die wir bei anderer Dichte oder anderer Temperatur des Wassers erhalten würden, durch Rechnung auf die Normaltemperatur desselben zurückzuführen.

Bei den Abwägungen bedient man sich der auf der nächsten Seite abgebildeten hydrostatischen Wage, die so eingerichtet ist, daß man den Wagebalken je nach Bedürfniß heben oder senken, und an der einen Schale die abzuwägenden Körper mittelst eines Häckchens aufhängen kann.

Um das **spezifische Gewicht eines festen Körpers** zu erhalten, welcher schwerer ist als Wasser, bestimmt man zuerst durch Abwägen in der Luft*) sein absolutes Gewicht, und hierauf sein Gewicht im Wasser,

*) Zwar erleiden die Körper beim Abwägen in der Luft auch einen geringen Verlust; allein dieser ist so unbedeutend, daß er bei den Abwägungen fester und flüssiger Körper wohl vernachläßigt werden kann.



indem man ihn, an der einen Schale der hydrostatischen Wage aufgehängt und in ein Gefäß mit Wasser eingetaucht, zum zweiten Male abwägt. Alsdann berechnet man seinen Gewichtsverlust im Wasser oder, was dasselbe ist, das Gewicht des von ihm verdrängten Wassers, indem man das zuletzt gefundene Gewicht von dem erstern abzieht; endlich dividirt man das absolute Gewicht des Körpers durch das des verdrängten Wassers, d. h. derjenigen Wassermenge, die mit ihm gleichen Raumgehalt hat: der Quotient ist das spezifische Gewicht des Körpers. Dieser wiege z. B. außerhalb des Wassers 11 Lth. 1 Quent, und 6 Lth. 3 Qu. in demselben, so ist sein Gewichtsverlust 4 Lth. 2 Qu. und daher sein spezifisches Gewicht $\frac{11^1/_4}{4^1/_2} = \frac{11,25}{4,5} = 2,5.$

Ist der Körper leichter als Wasser, so zwingt man ihn, in demselben unterzutauchen, indem man ihm einen schwereren Körper, dessen Gewichtsverlust im Wasser man vorher schon bestimmt hat, beigesellt. Indem man alsdann, wie oben, den Gewichtsverlust der beiden vereinigten Körper ermittelt, und hievon den schon bekannten des schwereren Körpers abzieht, erhält man den Gewichtsverlust des in Frage stehenden Körpers und damit zugleich das Gewicht der von ihm verdrängten Wassermenge, mittelst dessen man auf die oben angegebene Weise das spezifische Gewicht des Körpers berechnet. Der zu untersuchende Körper habe ein Gewicht von

3 Lth. $1\frac{1}{2}$ Qu.; der schwerere Körper, der ihm beim Abwägen im Wasser gleichsam als Ballast beigegeben wird, wiege 15 Lth. 2 Qu., und der Gewichtsverlust des letztern im Wasser, für sich allein, betrage 9 Lth. 1 Qu. Finden wir nun das Gewicht der vereinigten Körper im Wasser gleich 5 Lth. $3\frac{1}{2}$ Qu., so ergibt sich für dieselben ein Gewichtsverlust von 13 Loth (3 Lth. $1\frac{1}{2}$ Qu. + 15 Lth. 2 Qu. = 5 Lth. $3\frac{1}{2}$ Qu. + 13 Lth.). Da aber von diesem Gewichtsverlust 9 Lth. 1 Qu. auf den schwerern Körper zu rechnen sind, so bleibt für den leichtern ein Verlust von 3 Lth. 3 Qu. Das absolute Gewicht dieses Körpers ist aber 3 Lth. $1\frac{1}{2}$ Qu. = $3\frac{3}{8}$ Lth.; daher sein spezifisches Gewicht $\frac{3\frac{3}{8}}{3\frac{3}{4}} = \frac{3{,}375}{3{,}75} = 0{,}9$.

Wenn der zu untersuchende Körper im Wasser löslich ist, so sucht man seinen Gewichtsverlust in irgend einer andern Flüssigkeit von bekanntem spezifischem Gewicht, in welcher er unlöslich ist. Dieser Gewichtsverlust verhält sich alsdann zu dem, welchen er im Wasser erleiden würde, wie das spezifische Gewicht jener Flüssigkeit zu dem des Wassers, d. i. zu 1. Hiedurch läßt sich somit das Gewicht des Wassers, das mit dem Körper gleichen Raumgehalt hat, und sofort auch das gesuchte spezifische Gewicht des Körpers berechnen. Um z. B. das spezifische Gewicht des in Wasser löslichen Steinsalzes zu bestimmen, ermittelt man zuerst seinen Gewichtsverlust in Oel, in dem es unlöslich ist, und berechnet hieraus denjenigen, den es in Wasser haben müßte. Es wiege ein Stückchen Steinsalz außerhalb der Flüssigkeit 105 Gramme, und in Leinöl untergetaucht 58 Gr., so beträgt hier sein Gewichtsverlust 47 Gr. Da nun das spezifische Gewicht des Leinöls 0,94 ist, so verhält sich der Gewichtsverlust des Körpers im Leinöl zu dem, welchen er im Wasser erleiden würde, wie 0,94 zu 1 oder wie 94 zu 100; derselbe ist daher gleich $\frac{47 \,.\, 100}{94} = 50$ Gr. Hieraus ergibt sich für das spezifische Gewicht des Steinsalzes die Zahl $\frac{105}{50} = 2{,}1$.

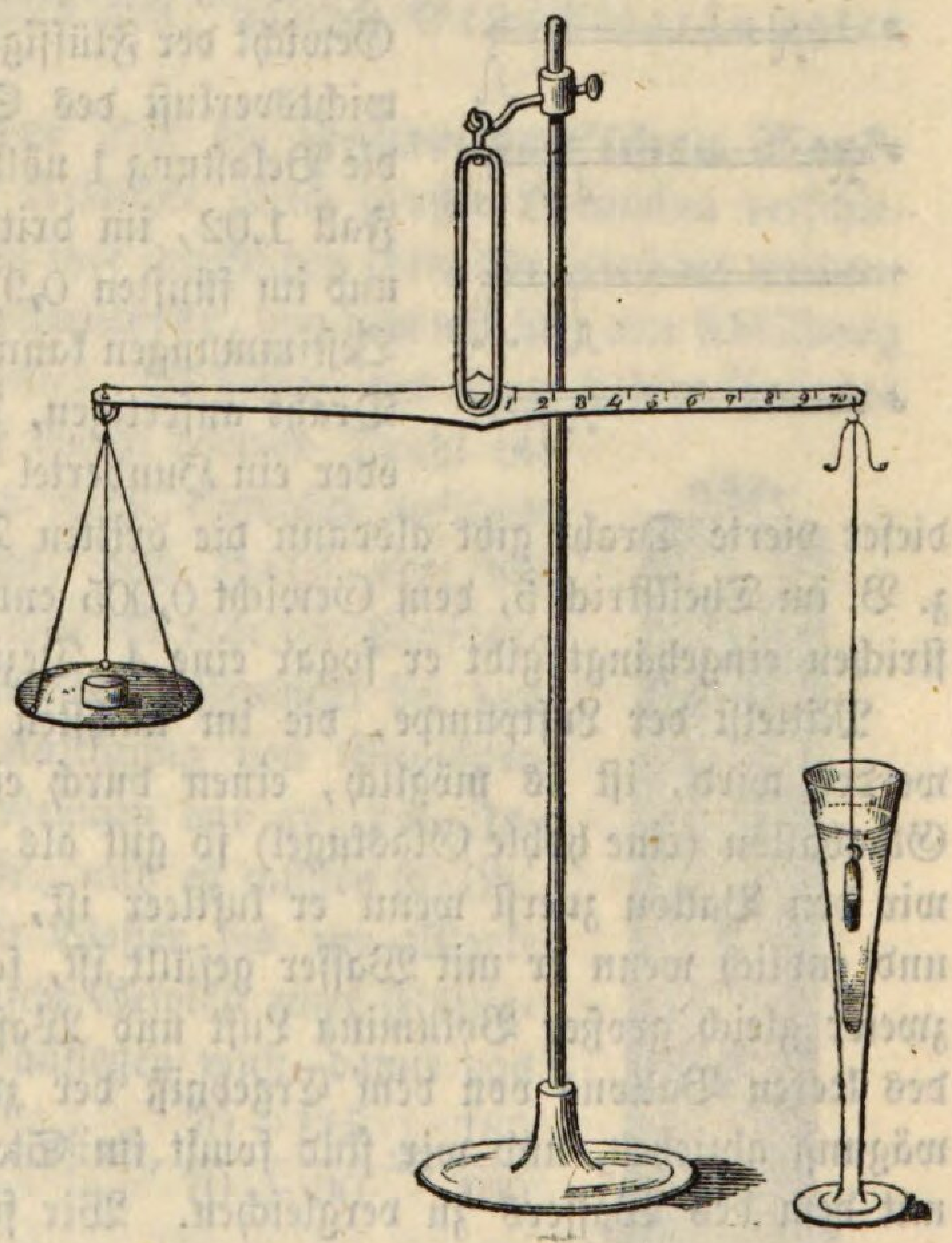
Soll das spezifische Gewicht pulverisirter und anderer fein zertheilter Körper bestimmt werden, so erhält man die sichersten Resultate, wenn man sowohl ihr Gewicht, als ihren Raumgehalt genau bestimmt, letzteren mittelst eines Volumenometers, und hierauf das Gewicht einer Wassermenge vom gleichen Volumen berechnet.

Um das **spezifische Gewicht einer Flüssigkeit** zu bestimmen, füllt man eine Flasche mit eingeriebenem, genau schließendem Stöpsel das eine Mal mit Wasser, das andere Mal mit der zu untersuchenden Flüssigkeit, und wägt jedesmal die volle Flasche ab. Das Gewicht der leeren Flasche von jedem der gefundenen Gewichte abgezogen gibt im

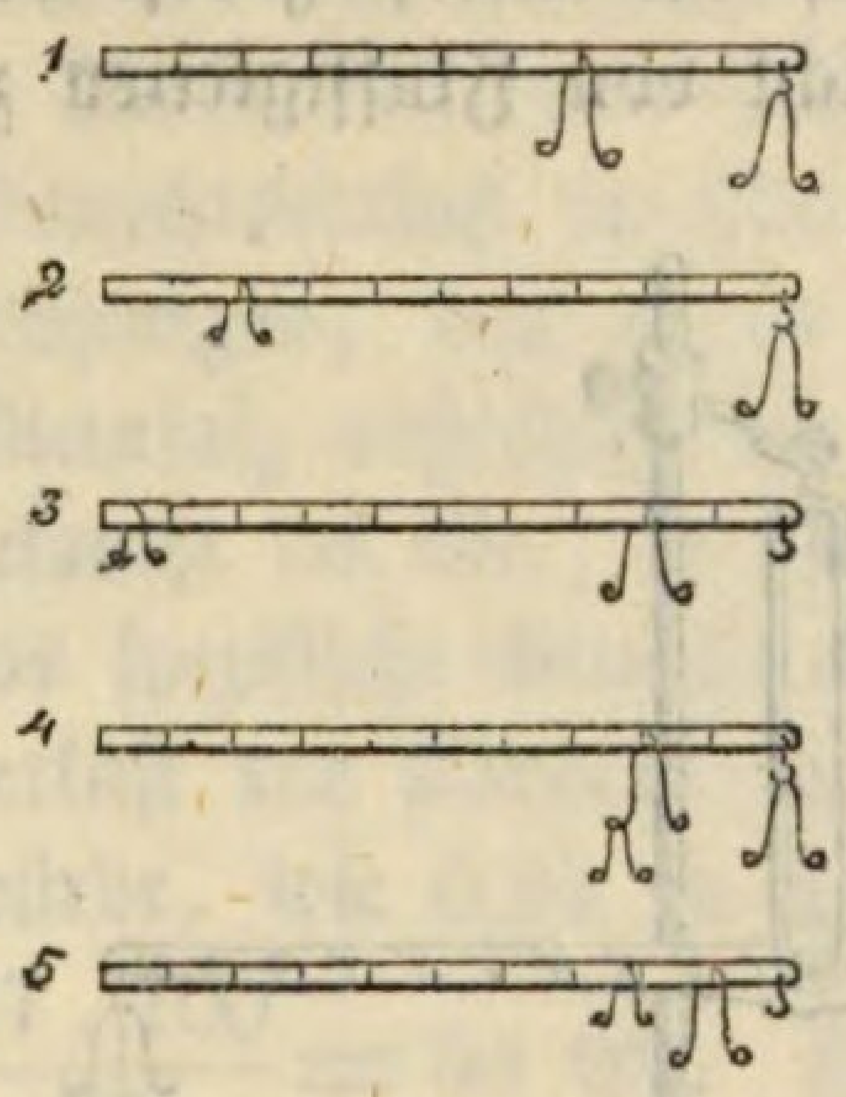
Rest die Gewichte gleicher Raumtheile der beiden Flüssigkeiten, aus denen das gesuchte spezifische Gewicht unmittelbar berechnet werden kann. Die leere Flasche wiege z. B. 10 Gr., mit Wasser gefüllt 35 Gr., und mit der zu bestimmenden Flüssigkeit gefüllt 33 Gr.; alsdann wiegt das Wasser in der Flasche für sich allein 25 Gr. und die Flüssigkeit, die den gleichen Raum erfüllt, 23 Gr.; das spezifische Gewicht der letzteren ist daher $\frac{23}{25} = 0{,}92$.

Eine andere sehr bequeme Methode, das spezifische Gewicht von Flüssigkeiten zu bestimmen, ist auch die folgende. Man bestimmt den Gleichgewichtsverlust eines und desselben festen Körpers sowohl in Wasser als in der zu untersuchenden Flüssigkeit. Diese Gewichtsverluste können alsdann, da sie die Gewichte gleicher Volumina der beiden zu vergleichenden Flüssigkeiten angeben, unmittelbar zur Berechnung des gesuchten spezifischen Gewichts benutzt werden. Der gleiche Körper verliere z. B. in Wasser 20 Gr. und in einer Kochsalzlösung 24 Gr. an seinem Gewicht; sein spezifisches Gewicht ist alsdann $\frac{24}{20} = 1{,}2$.

Durch Einfachheit des Verfahrens zeichnet sich die neue, zuerst von Mohr angewandte Methode, das spezifische Gewicht von Flüssigkeiten zu bestimmen, aus. Eine kurze, auf einer Seite geschlossene Glasröhre wird so weit mit Quecksilber oder Schrotkörnern gefüllt, daß sie in Flüssigkeiten, deren spezifisches Gewicht nicht über 2 beträgt — für solche ist diese Methode zunächst bestimmt —, eben noch untertaucht. Der offene Theil des Gläschens, der schon vorher in eine Spitze ausgezogen war, wird nun zugeschmolzen und zu einem Hacken umgebogen, so daß es mittelst eines Platindrahts am Ende eines Wagebalkens aufgehängt werden kann. Nachdem nun die Wage durch aufgelegte Ge-



wichte in's Gleichgewicht gebracht worden ist, wird das Senkgläschen in destillirtes Wasser von 4° Wärme getaucht, und der Gewichtsverlust durch einen in den Hacken eingehängten, gabelförmig gebogenen Messingdraht ersetzt. Solcher Drähte macht man sich zwei gleiche, und einen dritten, der zehnmal weniger wiegt. An der Biegung sind die Drähte etwas breit geschlagen, so daß sie scharf in die Einschnitte passen, die auf der einen Seite des Wagbalkens angebracht sind und diese in 10 gleiche Theile theilen. — Hat man nun eine Flüssigkeit, deren spezifisches Gewicht 2 ist, so muß man, um den Gewichtsverlust des Senkgläschens in derselben zu ersetzen, die zwei großen Drähte bei 10 einhängen, da dieser Gewichtsverlust doppelt so groß ist, als der in Wasser; ist das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit 1,5, so wird der eine größere Draht im Theilstrich 10, der andere im Theilstrich 5, wo er nur am halben Hebelarm wirkt, eingehängt werden müssen. Da der kleinere Draht nur $^1/_{10}$ eines größern wiegt, so bedeutet derselbe z. B. im 5. Theilstrich 0,05, im 9. Theilstrich 0,09, in der Mitte zwischen dem 6. und 7. Theilstrich (die Zwischenlagen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Theilstrichen müssen mit dem Auge abgeschätzt werden) 0,065 u. s. f. In der hier beigefügten Zeichnung sind 5 Fälle von Belastungen mittelst dieser Drähte angedeutet; der Leser wird nach dem Obigen leicht abnehmen, daß das spezifische Gewicht der Flüssigkeit, bei welcher, um den Gewichtsverlust des Senkgläschens auszugleichen, die Belastung 1 nöthig ist, gleich 1,7, im zweiten Fall 1,02, im dritten 0,805, im vierten 1,88 und im fünften 0,9775 ist. Zu noch genaueren Bestimmungen kann man sich noch einen vierten Draht anfertigen, der ein Zehntel vom dritten oder ein Hundertel von den beiden ersten wiegt; dieser vierte Draht gibt alsdann die dritten Dezimalstellen an, indem er z. B. im Theilstrich 5, dem Gewicht 0,005 entspricht; zwischen zwei Theilstrichen eingehängt gibt er sogar eine 4. Dezimalstelle an.



Mittelst der Luftpumpe, die im nächsten Abschnitt näher beschrieben werden wird, ist es möglich, einen durch einen Hahnen verschließbaren Glasballon (eine hohle Glaskugel) so gut als luftleer zu machen. Wägen wir den Ballon zuerst wenn er luftleer ist, hierauf wenn er mit Luft, und endlich wenn er mit Wasser gefüllt ist, so erfahren wir die Gewichte zweier gleich großer Volumina Luft und Wasser, wenn wir das Gewicht des leeren Ballons von dem Ergebniß der zweiten und der dritten Abwägung abziehen, und wir sind somit im Stande, das Gewicht der Luft mit dem des Wassers zu vergleichen. Wir finden auf diese Weise, daß

die Luft ungefähr 770 mal leichter ist, als das Wasser. Man ist jedoch überein gekommen, die Dichte der Gase nicht mit der des Wassers zu vergleichen, sondern die der trockenen atmosphärischen Luft bei der Temperatur von Null Grad und dem Normalbarometerstand von 28 Zoll oder 760 Millimeter als Einheit anzunehmen und auf diese die Dichten der übrigen Gase zu beziehen.

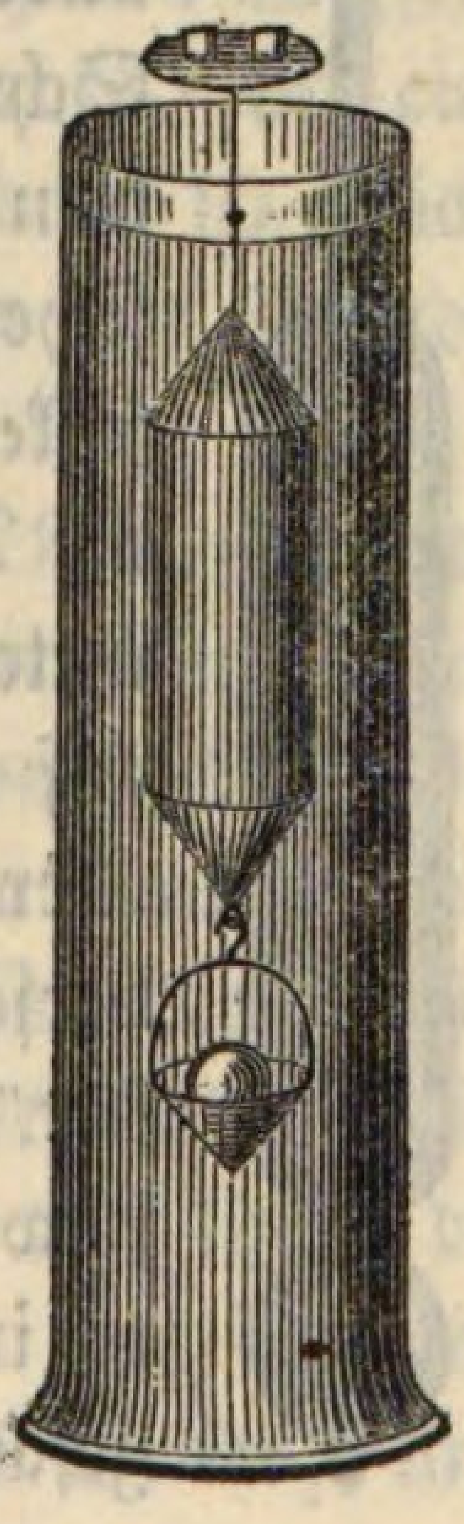
Die **spezifischen Gewichte der Gase** bezeichnen also, wie viel mal dieselben schwerer sind, als atmosphärische Luft. Man findet sie, indem man den eben angeführten Glasballon mit den zu untersuchenden Gasen füllt und wiegt, und so die Gewichte gleicher Volumina derselben bestimmt. Die weitere Rechnung ist ganz wie bei festen und flüssigen Körpern; nur ist dabei noch die Temperatur und der Barometerstand, wovon, wie wir im folgenden Abschnitt sehen werden, die Dichte der Gase theilweise abhängt, in der Art in Rechnung zu ziehen, daß ihre Dichte auf Null Grad Temperatur und auf den Normalbarometerstand zurückgeführt wird.

Die Senkwage.

Um das spezifische Gewicht von Flüssigkeiten zu bestimmen, bedient man sich am häufigsten der sogenannten Senkwagen oder Aräometer, deren es zwei verschiedene Arten gibt, nämlich Gewichtsaräometer und Skalenaräometer.

Die **Gewichtsaräometer** oder die **Fahrenheit'schen Senkwagen** zeigen die absoluten Gewichte gleich großer Volumina verschiedener Flüssigkeiten an, aus denen ihre spezifischen Gewichte berechnet werden.

Das **Nicholson'sche Aräometer,** von dem wir hier eine Abbildung beifügen, ist ein Gewichtsaräometer. Es besteht aus einem hohlen Cylinder aus Metallblech, der oben auf einem dünnen Draht ein Tellerchen trägt, auf das man kleine Gewichte auflegen kann. An dem dünnen Draht, dem Hals oder der Spindel, ist ein Zeichen, die Marke oder der Wasserpaß, angebracht, bis zu dem das Instrument bei den einzelnen Abwägungen durch Auflegung von Gewichten einzusinken gezwungen wird. Nehmen wir an, das Instrument wiege unbelastet 70 Gr., und es müssen 30 Gr. aufgelegt werden, damit es in Wasser bis zur Marke einsinke; alsdann ist das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit, bei welcher man 115 Gr. auflegen muß, damit das Aräometer bis zum Wasserpaß einsinkt, $\frac{70+115}{70+30} = \frac{185}{100}$ $= 1{,}85$.



Dieses Aräometer kann auch dazu gebraucht werden, das spezifische Gewicht fester Körper zu bestimmen. Zu diesem Zweck ist ihm unten ein Schälchen angehängt, das kleinere Körper aufnehmen kann. Legt man den zu untersuchenden Körper zuerst auf das Tellerchen und fügt ihm soviel Gewicht hinzu, bis das Instrument in Wasser bis zur Marke einsinkt, so erfährt man sein absolutes Gewicht, wenn man das ihm beigefügte Gewicht von den obigen 30 Gr. abzieht; hat man ihm z. B. 10 Gr. beigelegt, so ist sein absolutes Gewicht $30 - 10 = 20$ Gr. Hierauf legt man den Gegenstand in das unten angehängte Schälchen und ersetzt seinen Gewichtsverlust im Wasser durch weiter aufgelegte Gewichte; diese geben somit das Gewicht der Wassermenge an, die mit dem Körper gleichen Raumgehalt hat. Betragen beispielsweise die neu hinzugekommenen Gewichte 2,5 Gr., so ist das spezifische Gewicht des Körpers $\frac{20}{2,5} = 8$.

Die Skalenaräometer. Wenn ein und derselbe Körper auf verschiedenen Flüssigkeiten schwimmt, so sinkt er in denselben um so tiefer ein, je spezifisch leichter sie sind und umgekehrt; oder mit andern Worten:

Das spezifische Gewicht der Flüssigkeiten steht in umgekehrtem Verhältniß zu dem Volumen des untergetauchten Theils des schwimmenden Körpers.



Auf diesem Satz beruht die Einrichtung der Skalenaräometer, bei denen man aus der Tiefe, bis zu welcher sie in verschiedenen Flüssigkeiten einsinken, auf ihr spezifisches Gewicht schließt; das Gewicht des Aräometers selbst bleibt hier unverändert.

Das Skalenaräometer besteht gewöhnlich aus einer Glasröhre, die oben in einen langen, dünnen Stiel, die Spindel, ausläuft, und unten eine kugelförmige Erweiterung hat, die mit Schrotkörnern oder mit Quecksilber angefüllt wird, um einestheils dem Instrument beim Schwimmen eine senkrechte Stellung zu sichern, anderntheils dasselbe so zu belasten, daß es in den Flüssigkeiten, für welche es bestimmt ist, gehörig tief einsinkt. Um die Tiefe genau beobachten zu können, bis zu welcher das Aräometer in einer Flüssigkeit einsinkt, wird in die Spindel eine auf einen zusammengerollten Papierstreifen aufgetragene Skala oder Gradeintheilung eingeschoben und mit Siegellack in derselben befestigt. Soll ein solches Aräometer nicht allein für Flüssigkeiten, die leichter sind als Wasser, sondern auch für schwerere anwendbar sein, so muß der Punkt, bis zu welchem es in Wasser einsinkt — gewöhnlich der Nullpunkt —, ungefähr in der Mitte der Spindel liegen. Um aber nicht ge-

nöthigt zu sein, entweder der Spindel eine unbequeme Länge zu geben oder die Grade gar zu klein zu machen, fertigt man gewöhnlich von jeder Sorte zwei Aräometer an, wovon das eine für Flüssigkeiten, die leichter sind als Wasser — wir heißen sie im Folgenden kurzweg leichte Flüssigkeiten —, das andere für Flüssigkeiten, die schwerer sind als Wasser — schwere Flüssigkeiten —, bestimmt ist. Bei jenem ist der Nullpunkt aus einfachen Gründen unten an der Spindel, bei diesem am obersten Theil derselben angebracht.

Die Größe der Grade auf der Skala ist entweder ganz willkürlich gewählt, so daß sie namentlich in keiner näheren Beziehung zu dem oben aufgestellten Grundsatz steht, auf den sich die Einrichtung der Skalenaräometer im Allgemeinen gründet — Aräometer mit empirischer Skala —, oder es beruht die Eintheilung derselben auf irgend einer wissenschaftlichen Grundlage — Aräometer mit rationeller Skala —.

1) Aräometer mit empirischer Skala.

Die gebräuchlichsten Aräometer dieser Art sind die von Baumé und von Beck.

Die **Aräometer von Baumé** sind auf zweierlei Weise eingerichtet. Bei demjenigen Aräometer, das für schwere Flüssigkeiten bestimmt ist, ist der Punkt, oben an der Spindel, bis zu welchem das Instrument in Wasser von 14° Réaumür einsinkt, mit 0 bezeichnet. Ein zweiter Punkt, bis zu welchem das Aräometer in einer Lösung von 15 Gewichtstheilen Kochsalz in 85 Theilen Wasser einsinkt, trägt die Zahl 15. Der Zwischenraum von 0 bis 15 ist in 15 gleiche Theile oder Grade eingetheilt, und diese Grade sind nach unten fortgesetzt, soweit es die Bestimmung des Aräometers verlangt. Bei dem Aräometer dagegen, das für leichte Flüssigkeiten bestimmt ist, entspricht der Nullpunkt, unten an der Spindel, einer Auflösung von 1 Theil Kochsalz in 9 Theilen Wasser; und der Punkt, bis zu dem das Instrument in Wasser von 14° R. einsinkt, ist hier mit 10 bezeichnet. Die Länge von 0 bis 10 ist in 10 gleiche Grade eingetheilt, und diese Eintheilung ist bis zur Spitze der Spindel fortgesetzt.

Das **Aräometer von Beck** hat den entschiedenen Vorzug, daß der zweite Punkt, auf welchem außer dem Wasserpunkt die Eintheilung der Skale beruht, einer Flüssigkeit von ganz bestimmtem spezifischem Gewicht entspricht, während bei Baumé Salzauflösungen hiezu benutzt werden, deren spezifisches Gewicht mit der Reinheit des Kochsalzes wechselt. Beck bezeichnet nämlich den Punkt, bis zu welchem das Aräometer in einer Flüssigkeit von 0,85 spezifischem Gewicht einsinkt, mit 30, theilt die Länge zwischen diesem Punkt und dem Nullpunkt, welcher sich bei ihm stets auf reines Wasser von 10° R. bezieht, in 30 gleiche Grade, und

setzt diese Eintheilung nach oben und nach unten fort. Auch Beck hat zwei Aräometer, wovon das eine für schwere, das andere für leichte Flüssigkeiten bestimmt ist.

Um die spezifischen Gewichte zu erfahren, welche den einzelnen Aräometergraden nach Baumé und nach Beck entsprechen, bedient man sich der folgenden Tabellen:

I. Für Flüssigkeiten, die leichter sind, als Wasser.

(Araeometrum pro liquoribus aqua levioribus.)

Gr.	Baumé.	Beck.	Gr.	Baumé.	Beck.	Gr.	Baumé.	Beck.
0	—	1,0000	21	0,927	0,8900	41	0,819	0,8061
1	—	0,9941	22	0,921	0,8854	42	0,814	0,8018
2	—	0,9883	23	0,915	0,8808	43	9,809	0,7981
3	—	0,9826	24	0,909	0,8762	44	0,802	0,7944
4	—	0,9770	25	0,903	0,8717	45	0,800	0,7907
5	—	0,9714	26	0,898	0,8673	46	0,796	0,7871
6	—	0,9659	27	0,892	0,8692	47	0,791	0,7834
7	—	0,9604	28	0,886	0,8585	48	0,787	0,7800
8	—	0,9550	29	0,881	0,8542	49	0,782	0,7763
9	—	0,9497	30	0,875	0,8500	50	0,778	0,7727
10	1,000	0,9444	31	0,870	0,8457	51	0,773	0,7692
11	0,993	0,9392	32	0,864	0,8415	52	0,769	0,7658
12	0,986	0,9340	33	0,859	0,8374	53	0,765	0,7623
13	0,979	0,9289	34	0,854	0,8333	54	0,760	0,7589
14	0,972	0,9239	35	0,849	0,8292	55	0,756	0,7556
15	0,966	0,9189	36	0,844	0,8252	56	0,752	0,7522
16	0,959	0,9139	37	0,838	0,8212	57	0,748	0,7489
17	0,952	0,9090	38	0,833	0,8173	58	0,744	0,7456
18	0,946	0,9042	39	0,829	0,8133	59	0,739	0,7423
19	0,940	0,8994	40	0,824	0,8095	60	0,735	0,7391
20	0,923	0,8947						

II. Für Flüssigkeiten, die schwerer sind, als Wasser.

(Araeometrum pro liquoribus aqua gravioribus.)

Gr.	Baumé.	Beck.	Gr.	Baumé.	Beck.	Gr.	Baumé.	Beck.
0	1,000	1,0000	10	1,075	1,0625	20	1,162	1,1333
1	1,007	1,0059	11	1,083	1,0692	21	1,171	1,1409
2	1,014	1,0119	12	1,091	1,0759	22	1,180	1,1489
3	1,022	1,0180	13	1,100	1,0828	23	1,190	1,1565
4	1,029	1,0241	14	1,106	1,0897	24	1,199	1,1644
5	1,036	1,0308	15	1,116	1,0968	25	1,210	1,1724
6	1,044	1,0366	16	1,125	1,1039	26	1,221	1,1806
7	1,052	1,0429	17	1,134	1,1111	27	1,231	1,1888
8	1,060	1,0494	18	1,143	1,1184	28	1,242	1,1972
9	1,067	1,0559	19	1,152	1,1258	29	1,252	1,2057

Gr.	Baumé.	Beck.	Gr.	Baumé.	Beck.	Gr.	Baumé.	Beck.
30	1,261	1,2143	44	1,440	1,3492	58	1,678	1,5179
31	1,275	1,2230	45	1,454	1,3600	59	1,698	1,5315
32	1,286	1,2319	46	1,470	1,3710	60	1,718	1,5454
33	1,298	1,2409	47	1,485	1,3821	61	1,739	1,5596
34	1,309	1,2500	48	1,501	1,3934	62	1,760	1,5741
35	1,321	1,2593	49	1,516	1,4050	63	1,782	1,5888
36	1,334	1,2687	50	1,532	1,4167	64	1,804	1,6038
37	1,346	1,2782	51	1,549	1,4286	65	1,827	1,6190
38	1,359	1,2879	52	1,566	1,4407	66	1,850	1,6346
39	1,372	1,2977	53	1,583	1,4530	67	1,874	1,6507
40	1,384	1,3077	54	1,601	1,4655	68	1,898	1,6665
41	1,398	1,3178	55	1,618	1,4783	69	1,922	1,6832
42	1,412	1,3281	56	1,638	1,4912	70	1,947	1,7000
43	1,426	1,3386	57	1,659	1,5044			

2) Aräometer mit rationeller Skale.

Das **Volumeter von Gay-Lussac.** Der Punkt, bis zu welchem das Instrument in Wasser einsinkt, ist mit 100 bezeichnet; die darüber stehenden Grade, die mit 101, 102.... bezeichnet sind, gelten für leichte, die abwärts aufgetragenen und mit 99, 98.... bezeichneten für schwere Flüssigkeiten. Der Raumgehalt der Glasröhre zwischen zwei aufeinander folgenden Graden beträgt den 100. Theil des in Wasser einsinkenden Raumgehalts des Volumeters. Aus der Anzahl der Volumetergrade läßt sich das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit mit Hülfe des Satzes, daß sich das spezifische Gewicht umgekehrt verhält, wie der Raumgehalt des untergetauchten Theils des schwimmenden Körpers, leicht berechnen. Sinkt das Volumeter in einer Flüssigkeit z. B. bis zum 125. Grad ein, so ist ihr spezifisches Gewicht (aus $x : 1 = 100 : 125$) $= \frac{100}{125} = 0{,}8$; ebenso entspricht dem 80. Grad des Volumeters ein spez. Gewicht $= \frac{100}{80} = 1{,}25$ u. s. f. Man hat besondere Volumeter für leichte, und andere für schwere Flüssigkeiten. Die Eintheilung ist leicht, wenn die Spindel ihrer ganzen Länge nach gleich dick ist. Ist der Wasserpunkt (für reines Wasser von 14° R.) bestimmt, so hat man nur noch eine zweite Flüssigkeit herzustellen, deren spez. Gewicht genau einem bestimmten Volumetergrad entspricht, was mittelst der hydrostatischen Wage leicht geschehen kann; bei der Anfertigung eines für leichte Flüssigkeiten bestimmten Volumeters z. B. eine Flüssigkeit vom spez. Gewicht 0,8, dem nach dem Obigen der 125. Volumetergrad entspricht, und für die andere Art eine Flüssigkeit vom spez. Gewicht 1,25, dem der 80. Grad des Volumeters zukommt.

Aräometer mit Bezeichnung der spezifischen Gewichte. Bei diesen Aräometern sind die Grade ungleich groß, und zwar nimmt ihre Größe ab mit der Zunahme des spez. Gewichts. Es sei das spez. Gewicht einer Flüssigkeit beispielsweise 0,7, das einer zweiten 0,8, also um 0,1 größer; alsdann muß sich beim Eintauchen des Aräometers das von diesem verdrängte Volumen V der ersten Flüssigkeit zu dem Volumen V' der zweiten verhalten wie 0,8 : 0,7 = 8 : 7 = $^8/_8$: $^7/_8$. V' ist also um $^1/_8$ V kleiner als V. Nehmen wir eine dritte Flüssigkeit, deren spez. Gewicht um den gleichen Bruchtheil, nämlich wieder um 0,1, größer ist als das der zweiten, also = 0,9, so wird sich V' zu dem vom Aräometer verdrängten Volumen V'' der dritten Flüssigkeit verhalten, wie 0,9 : 0,8 = 9 : 8 = $^9/_9$: $^8/_9$; das Volumen V'' ist also um $^1/_9$ V' oder, da V' = $^7/_8$ V ist, um $\frac{1.7}{9.8}$ V = $^7/_{72}$ V kleiner als V'. Wir sehen hieraus, daß bei einer gleichen Zunahme des spez. Gewichts die Grade immer kleiner werden, und daß, da $^7/_{72}$ V kleiner ist als $^1/_8$ V, der Unterschied zwischen zwei aufeinanderfolgenden Graden nach unten immer kleiner oder nach oben immer größer wird.

Man hat auch hier gewöhnlich ein besonderes Aräometer für leichte Flüssigkeiten, und ein besonderes — oft auch zwei oder drei, weil die Grade für die schwersten Flüssigkeiten leicht zu klein werden — für schwerere Flüssigkeiten.

Prozentaräometer. Bei der Untersuchung des spez. Gewichts einer Flüssigkeit hat man gewöhnlich den Zweck, zu erfahren, wie viel Prozente eines Stoffs in einer Auflösung enthalten sind, und man hat daher Tabellen, in welchen die den einzelnen spez. Gewichten entsprechenden Prozentgehalte verschiedener Flüssigkeiten verzeichnet sind. Statt dessen verfertigt man aber auch Aräometer, bei denen die Grade mit dem Prozentgehalte bezeichnet sind, so daß man diesen unmittelbar ablesen kann; diese Aräometer heißen Prozentaräometer. Es versteht sich von selbst, daß ein solches Aräometer je nur für eine ganz bestimmte Auflösung bestimmt sein kann, da das spez. Gewicht der Auflösung in erster Linie von der Natur des aufgelösten Stoffs, Zucker, Alkohol, Kochsalz u. s. w., abhängt. Man hat daher Alkoholometer, Weinwagen, Branntweinwagen, Bierwagen, Essigwagen, Laugenwagen, Salzspindeln, Zuckermesser oder Saccharometer, Milchwagen oder Laktometer u. s. w. Die Eintheilung dieser Senkwagen wird auf dem Wege des Versuchs, indem man sich Auflösungen von verschiedenem Prozentgehalt verschafft, gemacht. Unter den Alkoholometern sind die bekanntesten die von Richter, von Tralles, von Gay-Lussac und von Meißner.

Tabelle der spezifischen Gewichte einiger der bekanntesten Stoffe.

Feste Körper.

Wasser = 1.

Hölzer (in lufttrockenem Zustand):

Ahorn	0,65	Erle	0,58
Apfelbaum	0,75	Esche	0,76
Birke	0,57	Fichte	0,45
Birnbaum	0,70	Kork	0,24
Buche	0,78	Linde	0,60
Ebenholz	1,23	Kastanie (wilde)	0,55
Eiche	0,73	Nußbaum	0,66
„ Kernholz	1,17	Pappel	0,38

Metalle:

Antimon	6,78	Kupfer	8,88
Blei	11,35	Kupferdraht	8,40
Eisen, geschmiedet	7,79	Neusilber	8,56
„ gegossen	7,25	Platin, gehämmert	21,31
Eisendraht	7,60	Silber	10,50
Gold, gehämmert	19,36	Stahl	7,80
„ gegossen	19,26	Wißmuth, gehämmert	9,88
Iridium	23,65	Zink	7,20
Kobalt	8,60	Zinn	7,30

Andere Stoffe:

Alabaster	2,74	Gyps, krystallisirt	2,33
Asbest	2,45	Kalkstein	2,70
Asphalt	1,10	Knochen	1,66
Bernstein	1,06	Kochsalz	2,08
Bimsstein	1,27	Kreide	2,69
Butter	0,94	Marmor	2,77
Caoutschuck	0,92	Meerschaum	1,20
Colophonium	1,07	Phosphor	1,77
Diamant	3,52	Porzellan	2,39
Eis	0,93	Quarz	2,65
Elfenbein	1,92	Salpeter	2,00
Glas, Bouteillen-	2,73	Sandstein	2,50
„ Krystall-	2,50	Schwefel	2,01
Granit	2,78	Steinkohle	1,35
Graphit	2,14	Wachs	0,97
Gummi arabicum	1,45	Zucker	1,61

Flüssigkeiten.

Wasser = 1.

Bier	1,03	Quecksilber	13,59
Blut	1,05	Säure, Essig-	1,06
Honig	1,45	„ Salpeter-	1,52
Meerwasser	1,03	„ Salz-	1,19
Milch	1,03	„ Schwefel-	1,85
Oel, Baum-	0,92	Wein, Champagner	0,96
„ Lein-	0,94	„ Madeira	1,04
„ Mohn-	0,92	Weingeist, wasserfreier	0,79
„ Stein-	0,78		
„ Terpentin-	0,87		

Gase.

Atmosphärische Luft = 1.

Ammoniakgas	0,60	Sauerstoff	1,10
Chlorgas	2,47	Schwefelgas	6,62
Jodgas	8,71	Schwefelige Säure	2,25
Kohlenwasserstoffgas	0,94	Stickstoff	0,97
Kohlensäuregas	1,52	Wassergas	0,62
Quecksilbergas	6,98	Wasserstoff	0,069

Einige Anwendungen der Lehre vom spezifischen Gewicht der Körper.

Wenn man das spezifische Gewicht und den Raumgehalt eines Körpers kennt, so läßt sich daraus sein absolutes Gewicht bestimmen; umgekehrt kann man den Raumgehalt berechnen, wenn man das spezifische und das absolute Gewicht kennt. Auch gibt das spezifische Gewicht ein Mittel in die Hand, um zu erkennen, ob gewisse Stoffe rein, oder ob sie durch spezifisch schwerere oder leichtere verfälscht sind; insbesondere läßt sich dadurch leicht berechnen, in welchem Verhältniß zwei Metalle in einer Legirung enthalten sind.

Ein Eisberg von 1200′ Länge, 300′ mittlerer Breite und 200′ mittlerer Höhe wird im Meer umhergetrieben; man fragt, wie groß der Raumgehalt des untergetauchten Theils und wie groß das Gewicht des ganzen Eisblockes sei. Der Eisberg und das verdrängte Meerwasser haben einerlei absolutes Gewicht; ihre Raumgehalte verhalten sich also umgekehrt, wie ihre spezifischen Gewichte. Wäre z. B. das spezifische Gewicht des Meerwassers doppelt so groß, als das des Eises, so wäre das Volumen des Eisberges doppelt so groß, als das des verdrängten Meerwassers; wäre das spezifische Gewicht des Meerwassers $^4/_3$ von dem

des Eises, also um $^1/_8$ größer als dieses, so müßte auch der Raumgehalt des Eises $^9/_8$ von dem der verdrängten Wassermasse sein, und der Raumgehalt des ganzen Eisberges müßte folglich um $^1/_8$ von dem Raumgehalt des untergetauchten Theils größer sein, als dieser letztere. Wir sehen hieraus, daß das Volumen des leichtern Körpers das des schwerern um den gleichen Bruchtheil übertrifft, um welchen das spezifische Gewicht des schwerern Körpers größer ist, als das des leichtern. Nehmen wir nun nach obiger Tabelle (indem wir die zweiten Dezimalstellen zur Vereinfachung der Rechnung weglassen) das spezifische Gewicht des Meerwassers zu 1,0 und das des Eises zu 0,9 an, so ist ersteres um 1,0—0,9 = 0,1 größer, als letzteres; 0,1 ist aber der neunte Theil von 0,9, also muß auch das Volumen des Eises um 1 Neuntel des verdrängten Wasservolumens größer sein, als dieses, oder: der aus dem Wasser hervorragende Theil des Eisberges muß $^1/_9$ von dem untergetauchten sein. Der Raumgehalt des untergetauchten Theils beträgt sonach das Neunfache des sichtbaren, und er ist demnach 9 . 1200 . 300 . 200 = 9 . 72000000 = 648000000 Kub.F.; das Volumen der ganzen Eismasse beträgt folglich 720000000 Kub.F. und ihr Gewicht 0,9 . 70 . 720000000 = 45360000000 Pfund, d. i. über fünfthalbhundert Millionen Centner.

Ein Kelch, der aus einer Legirung von Gold und Silber besteht, hat ein Gewicht von 1 Pfund 6 Loth $2^2/_5$ Quent; unter Wasser getaucht wiegt er 2 Lth. $1^3/_4$ Qu. weniger: wie viel reines Gold und reines Silber enthält der Kelch? — Das spezifische Gewicht des Goldes ist 19,3, das des Silbers 10,5; das Gold verliert daher $^1/_{19,3} = {}^{10}/_{193}$ und das Silber $^1/_{10,5} = {}^{10}/_{105}$ von seinem Gewicht, wenn es im Wasser gewogen wird. Es verliert also z. B. ein Loth Gold $^{10}/_{193}$, und ein Loth Silber $^{10}/_{105}$ Loth, und folglich letzteres an jedem Loth $^{10}/_{105} - {}^{10}/_{193} = {}^1/_{23}$ (annähernd) Loth mehr, als das Gold. Da der Kelch 38,6 Loth wiegt, so müßte sein Gewichtsverlust $^{38,6}/_{19,3} = 2$ Loth betragen, wenn er nur reines Gold enthielte; der Gewichtsverlust beträgt aber 2 Lth. $1^3/_4$ Qu., also $1^3/_4$ Qu. mehr. Dieser Mehrverlust ist dem darin enthaltenen Silber zuzuschreiben, dem nach dem Obigen, gegenüber dem Gold, per Loth ein Mehrverlust von $^1/_{23}$ Loth entspricht. Da nun $^1/_{23}$ Loth in $1^3/_4$ Quent ziemlich genau 10mal enthalten ist, so müssen 10 Loth des reinen Goldes durch 10 Loth Silber ersetzt sein, d. h. der Kelch muß 28 Lth. $2^2/_5$ Qu. Gold und 10 Lth. Silber enthalten.

Diese Rechnung hat zuerst Archimedes ausgeführt, als er von König Hiero von Syrakus beauftragt wurde, zu untersuchen, ob sein Goldschmid, der ihm eine Krone aus lauterem Golde zu verfertigen hatte, diese, wie die Sage ging und wie sich durch die Untersuchung herausstellte, mit Silber verfälscht habe.

Zweiter Abschnitt:

Aerostatik

oder

Lehre vom Gleichgewicht luftförmiger Körper.

Die luftförmigen Körper sind theils solche, welche durch Temperaturerniedrigung, oder durch Zusammendrückung auf einen kleinern Raum, oder durch Beides zugleich in den flüssigen Zustand übergehen, theils solche, welche durch kein bis jetzt bekanntes Mittel eine solche Veränderung erleiden. Jene, die unbeständigen oder coercibelen Gase, heißen wir gewöhnlich Dämpfe, diesen, den beständigen oder permanenten Luftarten, gibt man vorzugsweise den Namen Gase. So lange die Dämpfe dem Punkt noch ferne sind, wo sie die Luftform mit dem flüssigen Zustand vertauschen, so lange ist zwischen ihnen und den eigentlichen Gasen in Beziehung auf ihr mechanisches Verhalten kein Unterschied, und in sofern gelten die folgenden Betrachtungen auch für Dämpfe.

Wie wir im vorhergehenden Abschnitt das Wasser im Sinn von Flüssigkeit überhaupt gebraucht haben, so gilt uns auch in den folgenden Untersuchungen die atmosphärische Luft, welche wesentlich aus zwei permanenten Gasen, dem Sauerstoff und dem Stickstoff, besteht, als Stellvertreter aller übrigen luftförmigen Körper.

Die Gase haben mit den flüssigen Körpern das gemein, daß sich ihre kleinsten Theilchen außerordentlich leicht verschieben lassen; auch sind sie, wie diese, der Erdanziehung unterworfen, d. h. sie sind schwer. Dagegen unterscheiden sich die Gase von allen übrigen Körpern dadurch, daß die Zusammenhangskraft zwischen ihren Molekülen durch die Repulsivkraft der Wärme vollständig aufgehoben ist, so daß sich diese so weit von einander entfernen, als es ihnen der Raum gestattet. Man stelle eine Reihe luftleerer Flaschen auf, die durch verschließbare Röhren unter sich verbunden sind. Bringt man alsdann mit der ersten derselben eine mit Luft gefüllte Flasche durch eine offene Röhre in Verbindung, während die übrigen Verbindungsröhren noch geschlossen sind, so stürzt ein Theil

der in der vollen Flasche enthaltenen Luft mit Geräusch in die leere Flasche, bis dieselbe in beiden Flaschen gleichmäßig vertheilt ist. Oeffnet man hierauf die nächste Röhre, so vertheilt sich dieselbe Menge Luft in drei Flaschen ebenso gleichförmig; so in vier, fünf u. s. w., und endlich enthalten alle Flaschen, wie viele derselben es auch sein mögen, Luft von ganz gleicher Dichte.

So weit also auch die Lufttheilchen schon auseinander gerückt sein mögen, so streben sie sich doch immer noch weiter zu entfernen, und können nur durch äußere Hindernisse, etwa durch die Wände eines Gefässes, zurückgehalten werden. Und auch dann noch äußert sich dieses Bestreben durch einen auf die Gefäßwände ausgeübten Druck.

Der Druck, den der in ein Gefäß eingeschlossene luftförmige Körper auf die einzelnen Theile der Gefäßwände ausübt, ist der Größe der gedrückten Flächen proportional; daher gibt er, indem man ihn stets auf die Flächeneinheit bezieht, zugleich ein Maß für die Größe des Ausdehnungsbestrebens selbst, und wird in dieser Beziehung gewöhnlich mit den Namen Spannkraft, Expansivkraft oder Elastizität bezeichnet. Die Spannkraft eines Gases ist also die Größe seines Ausdehnungsbestrebens, ausgedrückt durch den Druck, den es auf die Flächeneinheit ausübt.

Ist, wie es unsere Figur darstellt, eine der Gefäßwände durch einen dicht verschließenden, beweglichen Kolben A ersetzt, so muß dieser, wenn wir seine Reibung an den Gefäßwänden und sein Gewicht gleich Null betrachten, durch eine Kraft A festgehalten werden, die im Fall des Gleichgewichts dem Druck gleich sein muß, den das im Gefäß enthaltene Gas auf denselben ausübt. Wird jene Kraft vermindert, so erhält die Spannkraft des Gases das Uebergewicht, und drängt den Kolben zurück; wird dieselbe vermehrt, so bewegt sich der Kolben in entgegengesetzter Richtung und drückt das Gas auf einen kleineren Raum zusammen. Durch diese Verminderung des Volumens wird aber das Gas dichter, und in gleichem Maß wächst auch seine Spannkraft, so daß diese zuletzt der äußern Kraft wieder das Gleichgewicht zu halten im Stande ist. Um z. B. das Gas auf den halben Raum zusammenzudrücken, und also die Dichte desselben zu verdoppeln, ist eine Kraft = 2 A nöthig, da auch die Spannkraft des Gases die doppelte geworden ist. Wir sagen daher:



Der Raum, den ein luftförmiger Körper einnimmt, und der auf ihn ausgeübte Druck stehen im umgekehrten Verhältniß zu einander;

oder mit andern Worten:

Die Spannkraft eines luftförmigen Körpers steht im geraden Verhältniß zu seiner Dichte.

Dieser Satz, in der einen oder andern Form, heißt nach seinem Erfinder das **Mariotte'sche Gesetz.** Es ist durch zahlreiche Versuche, worunter hauptsächlich die von den französischen Physikern Arago und Dulong angestellten Erwähnung verdienen, als ganz allgemein gültig erwiesen worden.

Bei den Versuchen über Ausdehnsamkeit und Zusammendrückbarkeit der Gase wendet man statt belasteter Kolben gewöhnlich Flüssigkeitssäulen an. Das Gas ist in dem verschlossenen Theil ac einer umgebogenen Röhre enthalten, und die Flüssigkeit, in der Regel Quecksilber, wird in den langen offenen Schenkel AD gegossen. Wenn alsdann z. B. die Quecksilbersäule AC die Luft in den Raum ac einschließt, so drückt eine doppelt so hohe Säule BD dieselbe Menge Luft auf den halben Raum bc zusammen u. s. f.



Auch die Temperatur hat einen wesentlichen Einfluß auf die Spannkraft der Gase, weßhalb auch das Mariotte'sche Gesetz nur dann zutrifft, wenn bei den darüber angestellten Versuchen die Temperatur derselben unverändert bleibt. Wie nämlich alle Körper durch die Wärme ausgedehnt werden, so ist dieß auch bei den luftförmigen der Fall. Wird daher die Temperatur eines Gases erhöht und sind die Wände des Gefässes von der Art, daß sie eine Ausdehnung des Gases zulassen, ohne daß sich ihr Gegendruck verändert, so nimmt dieses ein größeres Volumen ein, aber seine Spannkraft bleibt sich gleich. Könnten nun die Wände des Gefässes wieder zusammengerückt werden, so daß das Gas seine neue Temperatur behielte und zugleich sein früheres Volumen wieder einnähme, so müßte die Spannkraft des Gases nach dem Mariotte'schen Gesetz in demselben Verhältniß zunehmen, als das Volumen verkleinert werden mußte. Dieselbe Spannkraft muß aber nothwendig das Gas durch die gleiche Temperaturerhöhung dann erreichen, wenn es in einem Gefäß enthalten ist, das dem Gas keine Ausdehnung gestattet. Hieraus geht hervor, daß eine Temperaturerhöhung bei unveränderter Spannkraft eine Vergrößerung des Volumens, bei gleichbleibendem Volumen dagegen eine Erhöhung der Spannkraft zur Folge hat. Ferner ist nach dem Obigen klar, daß die Zunahme am Volumen zum ursprünglichen Volumen in demselben Verhältniß steht, wie der Zuwachs an Spann-

kraft zu der ursprünglichen, wenn in beiden Fällen eine gleiche Temperaturerhöhung stattfindet.

Durch zahlreiche Versuche hat man gefunden, daß, wenn man die Luft vom Gefrierpunkt des Wassers an bis zu seinem Siedpunkt, d. h. von 0° bis 100°, erwärmt, ihre Spannkraft mit jedem Grad Temperaturerhöhung um 0,003665 oder ziemlich genau um $^{11}/_{3000}$ der beim Gefrierpunkt stattfindenden Spannkraft zunimmt; bei 100° ist sie also 1,3665 oder $1^{11}/_{30}$, wenn sie bei 0° gleich 1 angenommen wird. Auf dasselbe Ergebniß ist man auch, mit fast unmerklichen Abweichungen, bei allen übrigen Gasen gekommen, die man bis jetzt untersucht hat, und es gilt daher dieser Bruchtheil für alle Gase ohne Unterschied, wenn es sich um praktische Anwendungen handelt.

Der Druck der Luft.

Daß die Luft schwer ist, läßt sich, wie dieß schon am Ende des vorhergehenden Abschnitts (S. 40) angedeutet worden ist, mittelst eines Glasballons durch unmittelbare Wägung nachweisen. Ein weiterer Beweis dafür ist das, daß sie die Erde gleich einem meilentiefen Meer umlagert: wären die Lufttheilchen der Schwerkraft nicht unterworfen, so wäre in der That kein Grund vorhanden, warum sie nicht in alle Welt sich zerstreuen, und den größtmöglichen Raum einnehmen sollten. Die Schwere allein ist es, welche der Abstoßungskraft, durch welche die einzelnen Moleküle immer weiter von einander entfernt werden müßten, entgegenwirkt, und welche die Luft an der Erde festhält. Aus den folgenden Betrachtungen werden sich überdieß zur Genüge Beweise für die Schwere der Luft ergeben.

Die Luft ist aber auch zusammendrückbar; es müssen daher die einzelnen Schichten um so dichter sein oder eine um so größere Spannkraft haben, je größer die Last der darauf liegenden Schichten ist, d. h. je tiefer sie liegen. Um sich hievon zu überzeugen, fülle man in der Ebene eine Flasche mit Luft, d. h. man nehme eine sogenannte leere Flasche, verschließe sie luftdicht, und steige damit auf einen Berg. Oben angekommen mache man eine feine Oeffnung in den Verschluß der Flasche, und alsbald wird ein Theil der in derselben enthaltenen Luft zischend austreten, weil die in der Höhe des Berges befindliche Luft vermöge ihrer geringeren Spannkraft der in der Flasche enthaltenen das Gleichgewicht zu halten nicht im Stande ist.

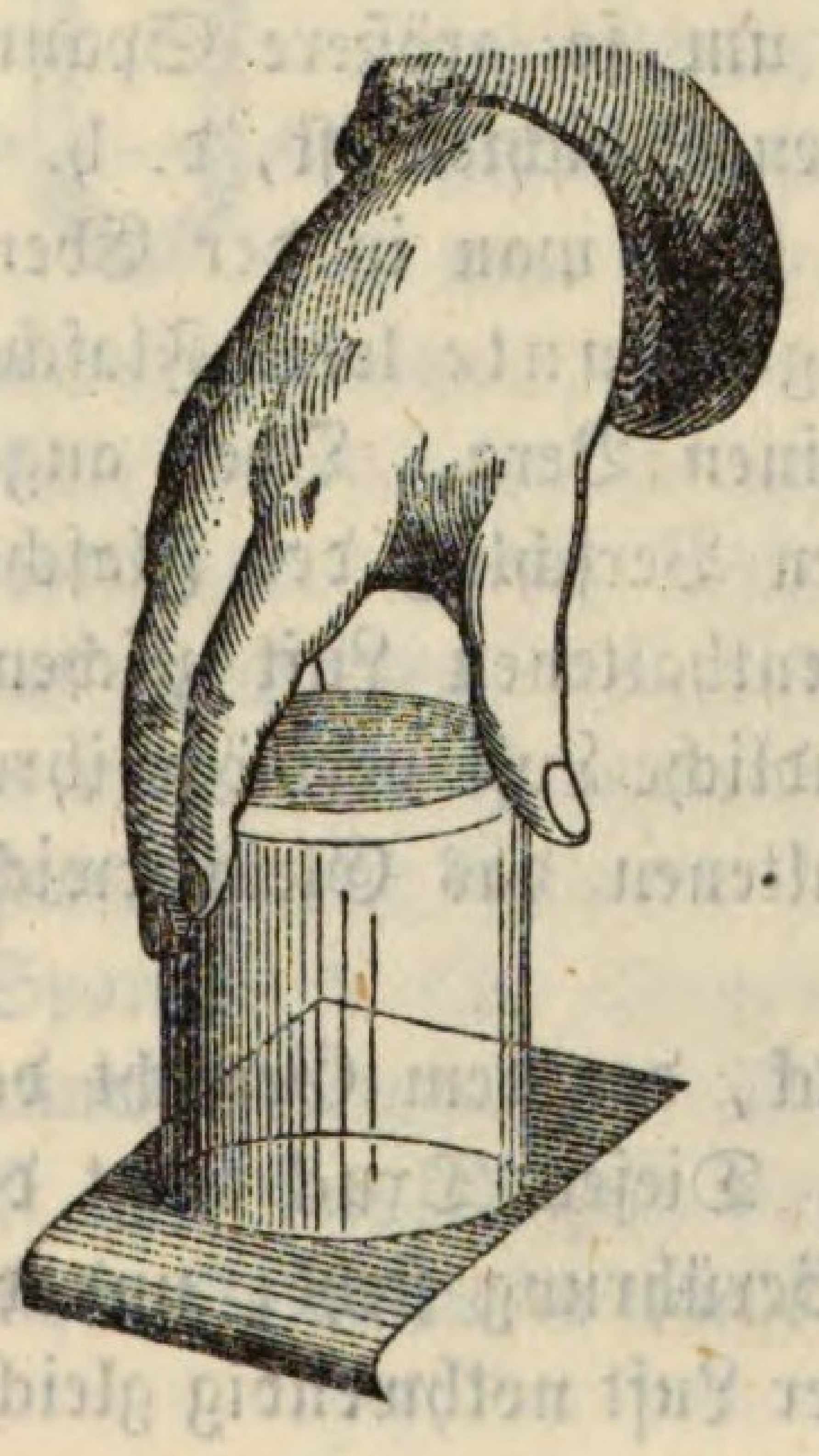
Jeder Theil der Luft steht unter einem Druck, der dem Gewicht der senkrecht darüber stehenden Luftsäule gleich ist. Diesen Druck trägt die Luft auf alle Körper über, mit denen sie in Berührung steht; und da alle Theile einer horizontalen Luftschicht bei ruhiger Luft nothwendig gleiche

Spannkraft haben, so üben sie auf gleich große Flächen einen gleich großen Druck aus, gerade wie das Wasser in einerlei Tiefe unter dem Niveau gleich große Theile der Gefäßwände gleich stark drückt. Zugleich verbreitet sich der Druck der Luft nach allen Seiten, nach unten und nach oben, in horizontaler und in schiefer Richtung. Endlich ist er derselbe im Zimmer wie im Freien, auf der Oberfläche der Körper wie im Innern derselben, vorausgesetzt, daß die mit Luft gefüllten hohlen Räume, Ritzen, Poren und dergl. mit dem äußern Raum in der Art kommunizirender Röhren in Verbindung stehen.

Mancherlei Erscheinungen im täglichen Leben haben ihren Grund im Drucke der Luft.

Wenn aus einem vollen Weinfaß bei geöffnetem Hahnen nichts ausfließt, so ist die Ursache gewöhnlich darin zu suchen, daß das Spundloch zu dicht verschlossen ist. Der Druck der Weinsäule von der Hahnenöffnung bis zum Niveau des Weins ist geringer, als der ihm entgegenwirkende Druck der äußern Luft, weßhalb dieser das Ausfließen des Weins verhindert; wird der Spund geöffnet, so drückt die Luft auch von oben auf den Wein, und hält dem von unten wirkenden Luftdruck das Gleichgewicht. Derselbe Fall tritt auch dann zuweilen ein, wenn oben im Faß sich schon Luft befindet; durch Ablassen von Wein wird dieser Luft ein größerer Raum geboten; sie dehnt sich aus, und ihre Spannkraft wird vermindert; geht dieß soweit, daß die Summe ihrer Spannkraft und des Drucks der Weinsäule geringer wird, als die Spannkraft der äußern Luft, so hört der Wein ebenfalls auf, auszufließen.

Wenn wir ein Glas ganz mit Wasser füllen, mit einem Blatt Papier zudecken, und dann umkehren, während wir zugleich das Papier mit der flachen Hand ringsum andrücken, so können wir sobald das Glas die

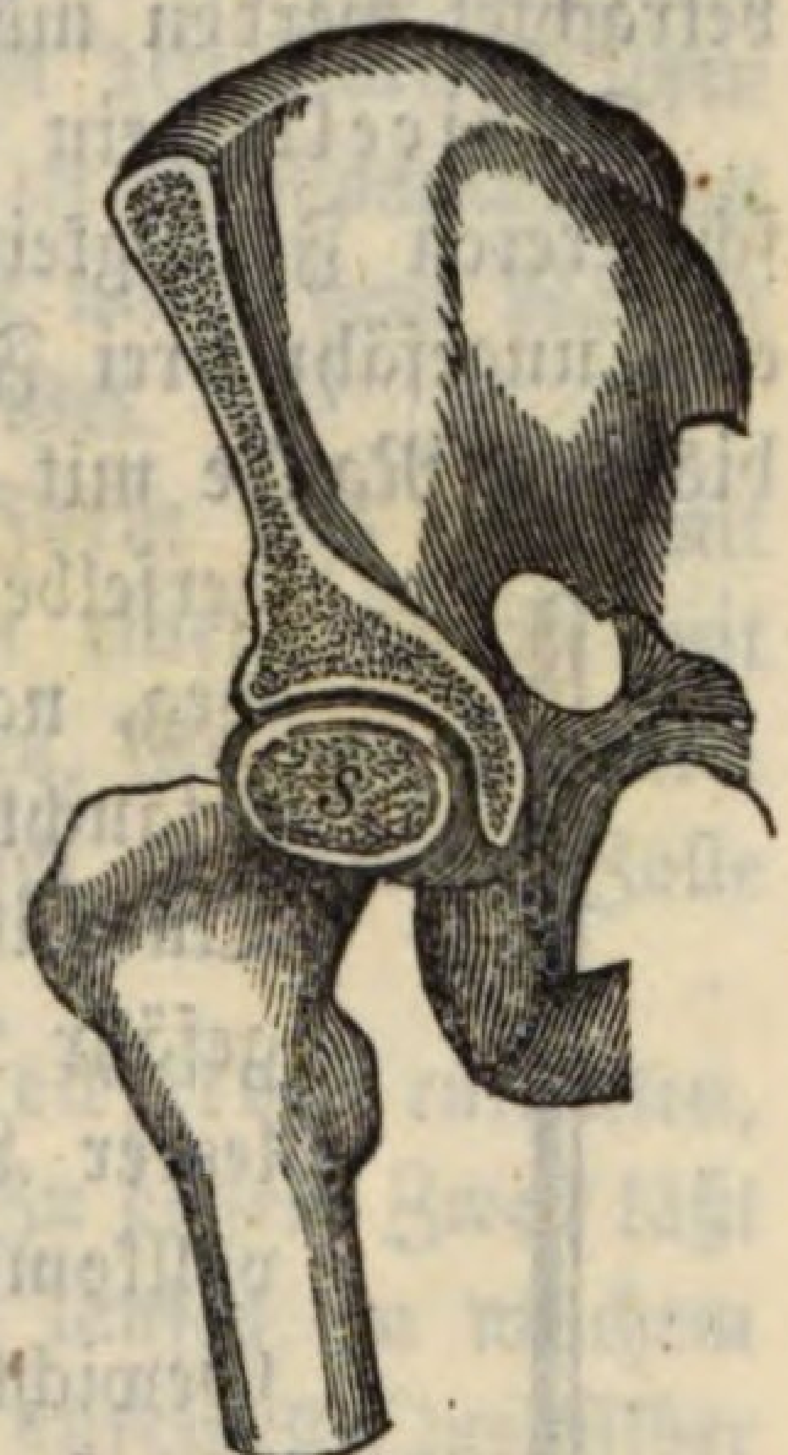


Stellung hat, wie sie unser Bild zeigt, die untere Hand entfernen, ohne daß das Wasser ausfließt, da nun der von unten nach oben wirkende Luftdruck das Papier festhält.

Das Ausfließen des Getränkes aus einer Flasche mit engem Hals erfolgt stoßweise und von einem eigenthümlichen Geräusch begleitet, welches wir das Glucken der Flasche nennen. Wenn nämlich eine Portion Flüssigkeit austritt, so dehnt sich die am Boden der umgekehrten Flasche befindliche Luft aus, und drückt nun weniger stark auf die Flüssigkeit, als die an der Mündung ihr entgegentretende Luft; der Ausfluß wird daher unterbrochen, und beginnt

jedesmal erst dann wieder, wenn die ausgetretene Flüssigkeit durch eine entsprechende Portion Luft, die in Form von Blasen in der Flasche aufsteigt, ersetzt ist.

Wenn wir die Arme hängen lassen, so haben die Muskeln, welche diese mit dem Rumpfe verbinden, nichts von dem Gewicht derselben zu tragen und sind daher ganz schlaff. Dasselbe gilt von den Muskeln, welche unsere Beine mit den Beckenknochen verbinden; auch diese Muskeln verspüren nichts von einer Last, wenn wir, mit dem einen Fuß auf einer Erhöhung stehend, den andern frei hängen lassen. Wer mag beim ersten Blick auf den Gedanken kommen, daß hier wiederum die Luft im Spiele ist! Und doch ist es der Luftdruck allein, der durch eine sehr weise Einrichtung der Natur unsere Arme und Beine trägt. Die Gelenkköpfe des Oberarms und Oberschenkels sind nämlich in glatte, mit schlüpfriger Knorpelhaut überzogene Pfannen, die Gelenkgruben am Schulterblatt und am mittlern untern Theil der Beckenknochen, so eingelassen, daß sie sich unter luftdichtem Verschluß leicht nach allen Richtungen drehen können. (In der beigefügten Zeichnung ist der Schenkelkopf S und der Beckenknochen durchschnitten dargestellt, damit man sieht, wie jener in seiner Pfanne sitzt.) An diese Pfannen werden die Gelenkköpfe durch die Luft angedrückt und dadurch die Gliedmaßen schwebend erhalten. Man hat dieß durch Versuche an Leichnamen außer allen Zweifel gesetzt; denn selbst nachdem die Muskeln und Bänder, welche diese Theile mit dem Rumpf verbinden, durchschnitten waren, blieben sie noch hängen, und erst, als der luftdichte Verschluß durch eine mittelst des Bohrers angebrachte Oeffnung aufgehoben wurde, fielen die Glieder vom Rumpfe ab.

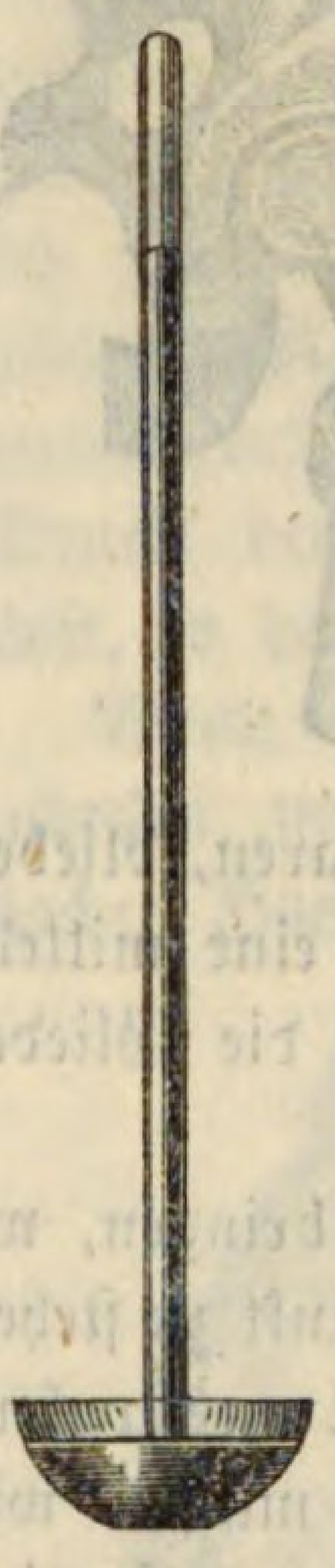


Sobald wir aber einen Arm oder ein Bein in eine Lage bringen, wo ihr Schwerpunkt nicht mehr senkrecht unter ihren Aufhängepunkt zu stehen kommt, wie dieß z. B. der Fall ist, wenn wir sie horizontal ausstrecken, so fühlen wir recht wohl das Gewicht derselben; denn hier müssen wir die Gliedmaßen mit der Kraft der Muskeln tragen und haben also eine ähnliche Anstrengung, wie wenn wir etwa eine eiserne Stange, die an einem festen Punkt aufgehängt ist, und in senkrechter Lage von diesem getragen wird, in schräger oder horizontaler Stellung schwebend erhalten.

Wir haben in einem dieser Beispiele gesehen, daß die Luft im Stande ist, die in einem umgekehrten Glase enthaltene Wassersäule zu tragen. Es fragt sich nun, um die **Größe des Luftdrucks** genau zu bestim-

men, welche Höhe diese Wassersäule im äußersten Falle erreichen darf, damit die Luft noch im Stande sei, ihr das Gleichgewicht zu halten. Daß eine Grenze wirklich vorhanden ist, erfuhren zu ihrem großen Erstaunen jene Pumpenmacher in Florenz, welche um das Jahr 1640 mittelst einer Pumpe Wasser auf eine ungewöhnliche Höhe heben wollten. Trotz dem daß die Pumpe in allen Theilen mit besonderer Sorgfalt ausgearbeitet worden war, stieg das Wasser darin nicht über 32 Fuß. Galiläi, Professor der Physik zu Bologna, der von dieser Erscheinung Kenntniß erhielt, erkannte sogleich, daß der wahre Grund derselben im Luftdruck zu suchen sei, und daß die damals noch in Geltung stehende Ansicht, welche das Eindringen der Flüssigkeiten in luftleere Räume aus dem Abscheu der Natur vor dem Leeren (lat. horror vacui) erklärte, als irrig betrachtet werden müsse.

Toricelli, ein Schüler Galiläi's, machte weitere Versuche mit einer schwereren Flüssigkeit als Wasser, nämlich mit Quecksilber. Er füllte eine ungefähr drei Fuß lange, an einem Ende zugeschmolzene Glasröhre bis zum Rande mit Quecksilber, kehrte sie um, indem er das offene Ende



derselben mit dem Finger zuhielt, und zog den Finger erst weg, nachdem er die Oeffnung der Röhre unter Quecksilber getaucht hatte, das er in einem Schälchen bereit hielt. Das Quecksilber sank in der Röhre bis zu einer Höhe von ungefähr 28 Zoll herab, und über demselben blieb ein luftleerer Raum. Hiedurch sah er die Ansicht seines Lehrers vollkommen bestätigt: das Quecksilber hat das spezifische Gewicht 13,59; eine Wassersäule, welche ebenso schwer ist als eine Quecksilbersäule von 28 Zoll, hat folglich eine Höhe von 13,59 . 28 = 380,52 Zoll oder (1 Par. Fuß = 12 Zoll) nahezu 32 Fuß, also genau die Höhe, welche von jenen Pumpenmachern beobachtet worden war.

Der Luftdruck ist somit im Stande, eine Wassersäule von 32 Fuß oder eine Quecksilbersäule von 28 Zoll zu tragen. Eine Wassersäule von dieser Höhe und von 1 Quadr.Fuß Grundfläche hat ein Gewicht von 32 . 70 = 2240 Par. Pfund; dies ist folglich die Größe des Drucks, den die Luft auf eine Fläche von 1 Quadr.Fuß ausübt*).

Man nimmt die Gesammtoberfläche des menschlichen Körpers gewöhnlich zu 15 Quadr.Fuß an; derselbe erleidet also von außen einen Luftdruck von 15 . 2440 = 33600 Pfd. Daß wir von dieser ungeheuren

*) In würt. Maß beträgt die Höhe der von der Luft gehobenen Wassersäule 36 Fuß, und der Luftdruck auf 1 Quadr.Fuß berechnet 1810 Pfd.

Last nicht zermalmt werden, ja sie nicht einmal fühlen, ist dem Umstand zuzuschreiben, daß auch das Innere unseres Körpers allenthalben von Luft durchdrungen ist, welche sich mit gleicher Spannkraft dem äußeren Druck entgegenstellt und ihm das Gleichgewicht hält.

Die Mechaniker sind gewohnt, die Spannkraft des Wasserdampfs mit dem Luftdruck zu vergleichen, d. h. diesen als Maß für dieselbe zu gebrauchen; daher spricht man z. B. von Wasserdampf von einer, zwei, drei ꝛc. Atmosphären. Wasserdampf von 3 Atmosphären übt demnach auf den Quadratfuß einen Druck von 3 . 2240 = 6720 Par. Pfd. aus.

Da der Luftdruck nicht überall und nicht immer dieselbe Größe hat, und es doch bei vielen Untersuchungen von der höchsten Wichtigkeit ist, denselben an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Zeit genau zu kennen, so bedient man sich zur Messung desselben der Toricelli'schen Röhre, indem man sie zur bequemeren und genaueren Beobachtung mit einer Skale versieht. In dieser Form kennen wir sie unter dem Namen Barometer, was Schweremesser der Luft bedeutet.

Das **Barometer** besteht in seiner einfachsten Form aus einer mit Quecksilber gefüllten Glasröhre, welche entweder in einem Gefäß mit Quecksilber steht, oder am offenen Ende zu einem zweiten, kürzeren Schenkel umgebogen ist, und aus einer Skale, die gewöhnlich in Pariser Zolle oder in Millimeter eingetheilt ist.

Ein gutes Barometer muß für's Erste reines Quecksilber enthalten, da auf der Reinheit sein spezifisches Gewicht beruht. Zu diesem Zweck läßt man es durch einen engen Trichter aus Schreibpapier laufen, in welchem Staub und der graue Ueberzug zurückbleiben, wovon unreines Quecksilber gewöhnlich bedeckt ist, und der aus den Oxyden der fremden Metalle besteht, die dem Quecksilber oft beigemischt sind. Um sicher zu sein, daß das Quecksilber von diesen ganz frei sei, schüttelt man es einige Zeit mit Salpetersäure, wascht es hierauf mit Wasser aus, und trocknet es sorgfältig mit Fließpapier.

Ein zweites Haupterforderniß ist, daß der leere Raum über dem Quecksilber — die sogenannte Toricelli'sche Leere — auch wirklich luftleer sei. Es muß daher sowohl die an den Röhrenwänden adhärirende, als die vom Quecksilber absorbirte Luft sorgfältig entfernt werden. Zu diesem Zweck wird das Quecksilber zuerst gekocht, dann in kleinen Portionen heiß in die Röhre gegossen, und jede einzelne Portion in der Röhre wieder in's Sieden gebracht. Um zu prüfen, ob der Raum über dem Quecksilber wirklich luftleer sei, neige man das Barometer sachte, und beobachte, ob sich an der Spitze der Röhre eine Luftblase zeigt, wenn das Quecksilber ganz hinaufgestiegen ist. Wenn gar keine Luft in der Toricelli'schen Leere vorhanden ist, so vernimmt man einen ziemlich harten Schlag, wenn

man das Quecksilber etwas rasch bis an die Spitze der Röhre zurückfließen läßt.

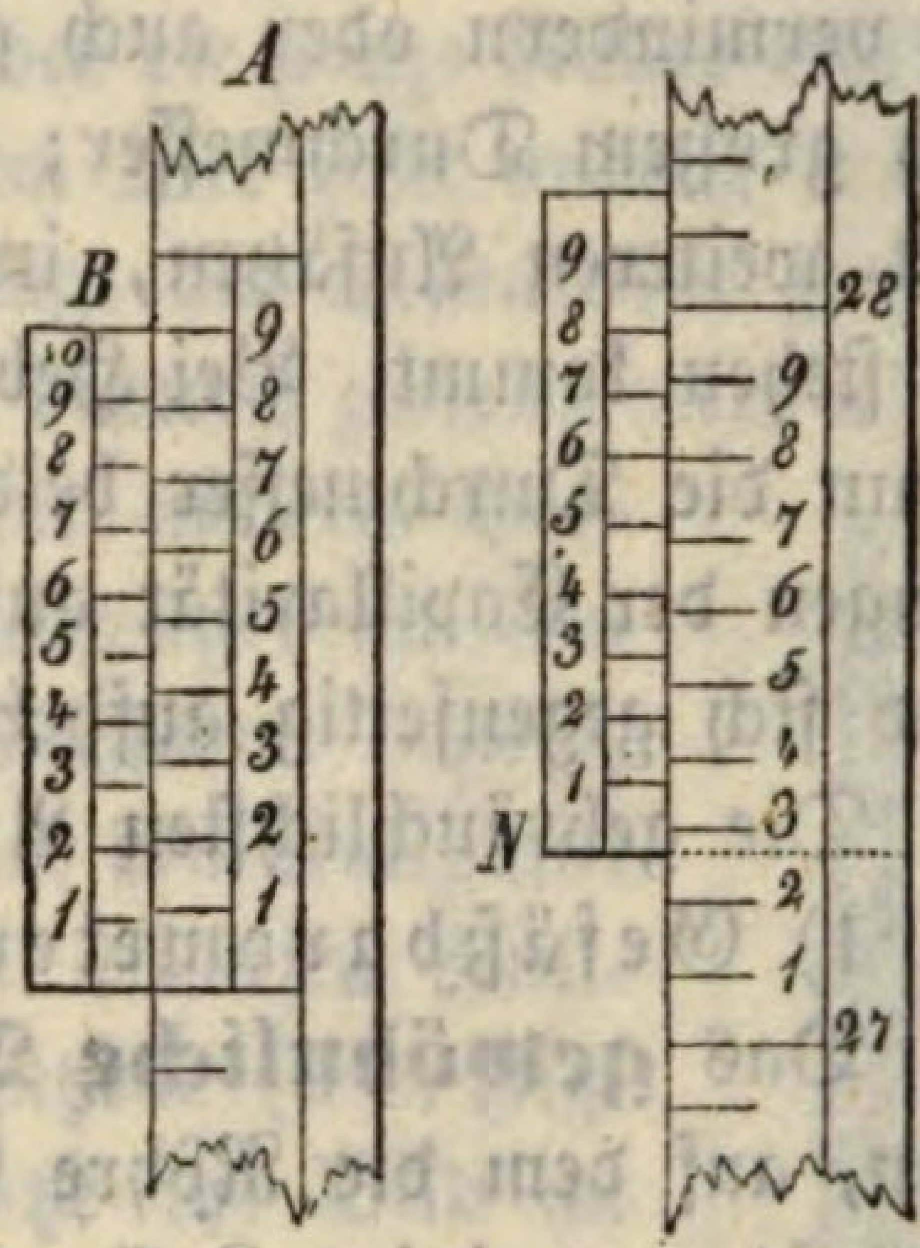
Der Luftdruck ist sehr veränderlich; daher ist auch die Höhe der Quecksilbersäule im Barometer in einem fast unaufhörlichen Schwanken begriffen. Mit der Veränderung des obern Quecksilberniveau's wechselt aber zugleich auch die Höhe des untern, da ein Zurücktreten des obern Spiegels, in Folge einer Abnahme des Luftdrucks, nothwendig eine Hebung des untern Spiegels zur Folge hat, und umgekehrt. Bei gewöhnlichen Barometern, bei denen es nicht auf große Genauigkeit ankommt, und deren Quecksilbersäule keinen allzugroßen Veränderungen unterworfen ist, weil sie in der Regel längere Zeit hindurch am gleichen Ort, d. h. in derselben Höhe der Atmosphäre bleiben, reicht es hin, dem Gefäß einen im Verhältniß zur Weite der Röhre großen Durchmesser zu geben, so daß selbst ziemlich bedeutende Schwankungen der Quecksilbersäule nur ganz unmerkliche Hebungen und Senkungen des untern Niveau's zu veranlassen vermögen. Macht man z. B. den Durchmesser des Gefässes 10mal so groß als den Durchmesser der Röhre, so ist der Querschnitt des Gefässes das Hundertfache von dem der Röhre, und ein Sinken des obern Quecksilberspiegels von einem Zoll bringt eine Hebung des untern von nur 1/10 Linie hervor.

Bei Barometern aber, welche zu schärferen Beobachtungen, wie sie namentlich zu wissenschaftlichen Zwecken gemacht werden, bestimmt sind, muß die Einrichtung so getroffen werden, daß der Abstand des untern und des obern Spiegels auf's Genaueste ermittelt werden kann. Dies wird bei den Barometern mit Gefässen, den Gefäßbarometern, dadurch bezweckt, daß man einen beweglichen Gefäßboden anbringt, durch dessen Hebung oder Senkung das untere Quecksilberniveau stets auf den Nullpunkt eingestellt werden kann; bei den Barometern mit gekrümmter Röhre, den Heberbarometern, richtet man es so ein, daß man entweder die Barometerröhre oder die Skale verschieben kann, oder endlich bringt man den Nullpunkt der Skale zwischen den beiden Quecksilberspiegeln an, und addirt alsdann die beobachteten Abstände derselben von dem unveränderlichen Nullpunkt.

Wenn die Höhe des Barometerstandes richtig abgelesen werden soll, so muß sich das Auge mit dem höchsten Punkt der Quecksilberkuppe in gleicher Höhe befinden. Ist die Eintheilung nicht auf der Röhre selbst, wie dieß häufig der Fall ist, sondern neben derselben angebracht, so muß bei genauen Instrumenten ein beweglicher Zeiger da sein, welcher eine horizontale, gerade Linie von der Quecksilberkuppe zu den Theilstrichen zieht. Um auch noch Bruchtheile des kleinsten Maßes, das die Eintheilung enthält, angeben zu können, ist der verschiebbare Zeiger häufig mit einem

Nonius verbunden, und ein Mikroskop, das sogenannte **Absehen**, ist zur Unterstützung des Auges angebracht.

Anm. Der **Nonius** oder **Vernier** ist eine an genauen Meßinstrumenten vielfach in Anwendung gebrachte Vorrichtung; seine Einrichtung beruht auf Folgendem: 9 Theile der Skale A sind auf dem Nonius B in 10 Theile getheilt; 1 Theil des Nonius ist also $^{9}/_{10}$ von einem Theil der Skale, oder 1 Theil von jenem ist um $^{1}/_{10}$ kleiner als 1 Theil der letztern. Bezeichnen die Theilstriche der Skale z. B. Linien, so steht der erste Theilstrich des Nonius um $^{1}/_{10}'''$ vom ersten Theilstrich der Skale ab, der zweite Theilstrich des Nonius um $^{2}/_{10}'''$ vom zweiten Theilstrich der Skale u. s. f. Soll nun z. B. angegeben werden, um wie viel die Linie NM vom 2. Theilstrich der Skale absteht,



so stellt man den Nullpunkt des Nonius auf die Linie NM ein, und beobachtet, der wie vielte Theilstrich des Nonius mit einem Theilstrich der Skale genau übereinstimmt. In unserer Zeichnung ist dies der sechste. Daraus schließen wir, daß der fragliche Abstand $^{6}/_{10}$ Linien beträgt; denn der Abstand der Linie NM von 6 des Nonius ist um $^{6}/_{10}'''$ kleiner als der Abstand des Theilstrichs 2 von 8 der Skale, der 6 volle Linien beträgt, und dieser Unterschied ist eben das zwischen 2 der Skale und der Linie NM gelegene Stück. Wäre NM etwa der Zeiger am Barometer, so hätten wir für die Barometerhöhe: 27″ 2,6‴. — Auf gleiche Weise kann man sich durch den Nonius ganz beliebige Bruchtheile verschaffen, indem man eine beliebige Zahl von Theilen der Hauptskale auf dem Nonius in eine um 1 verminderte oder auch vermehrte Anzahl von Theilen eintheilt.

Daß die Barometerröhre sammt der Skale eine genau **vertikale** Lage haben muß, wenn die Angaben richtig sein sollen, braucht wohl kaum erst gesagt zu werden, da unter Barometerhöhe der **Vertikalabstand** der freien Oberflächen des Quecksilbers verstanden ist, und einem und demselben Vertikalabstand eine um so längere Säule in der Barometerröhre entspricht, je geneigter die Lage dieser ist. Genaue Barometer sind deßhalb mit Libellen versehen.

Auch die **Temperatur** hat Einfluß sowohl auf die Höhe der Quecksilbersäule, als auf die Länge der metallenen Skale; genaue Barometer müssen daher mit Thermometern versehen sein. Die beobachteten Barometerhöhen werden alsdann durch Rechnung auf 0° Temperatur zurückgeführt, was keine Schwierigkeit hat, da man sowohl für Quecksilber

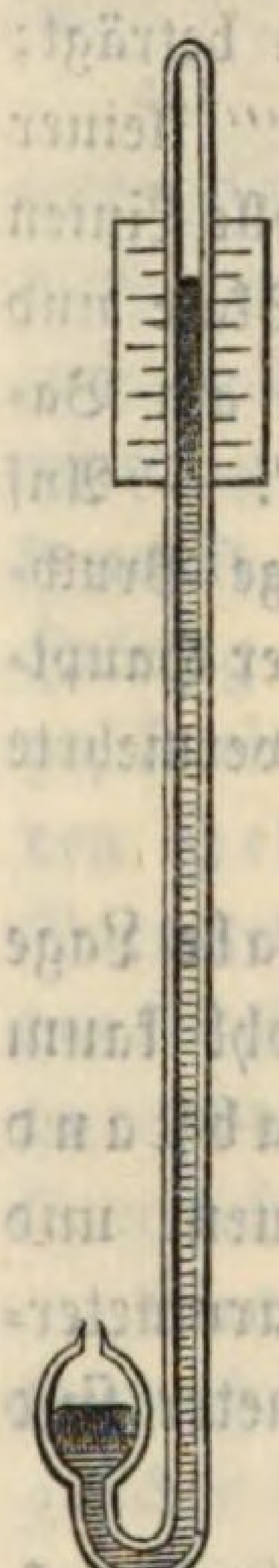
als auch für Messing, woraus die Skale in der Regel besteht, den Bruchtheil kennt, um welchen ihre Ausdehnung in die Länge mit jedem Temperaturgrad zunimmt.

Endlich ist noch die Wirkung der Capillarität zu berücksichtigen, und zwar um so eher, je enger die Barometerröhre ist. Um sie möglichst zu vermindern oder auch ganz aufzuheben, nimmt man Röhren von möglich großem Durchmesser; häufig versieht man enge Röhren an dem Theil mit weiteren Ansätzen, in welchen die freie Oberfläche des Quecksilbers zu stehen kommt. Bei Heberbarometern wird dieser Einfluß ganz beseitigt, wenn die Durchmesser beider Schenkel gleich sind, da alsdann die Wirkungen der Capillarität auf der einen und andern Seite gleich groß sind, und sich gegenseitig aufheben.

Die gebräuchlichsten Arten von Barometern sind:

1) Gefäßbarometer.

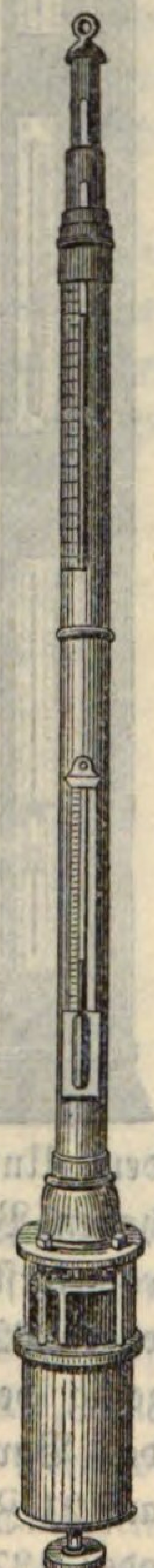
Das **gewöhnliche Barometer** besteht aus einem einfachen Brettchen, auf dem die Röhre samt dem Gefäß befestigt ist. Die Eintheilung umfaßt nur einige Zolle, denjenigen Raum nämlich, den die Quecksilbersäule unter gewöhnlichen Umständen an einem und demselben Ort nicht überschreitet. Da es in der Regel als Wetterprophet — daher der Name Wetterglas — gebraucht wird (s. Meteorologie, Buch VI.), so sind häufig Bemerkungen angeschrieben wie „Schön“ (Wetter) „Veränderlich“ „Regen“ „Sturm“ 2c. Hieher gehören hauptsächlich die sogenannten Birnbarometer, bei welchen das Gefäß durch eine birnförmige Erweiterung der Glasröhre am umgebogenen, offenen Ende der Röhre ersetzt ist, so daß sie dem Aeußern nach den Heberbarometern gleichen, obgleich sie zu den Gefäßbarometern gezählt werden müssen, weil das untere Niveau beim Ablesen nicht berücksichtigt wird.



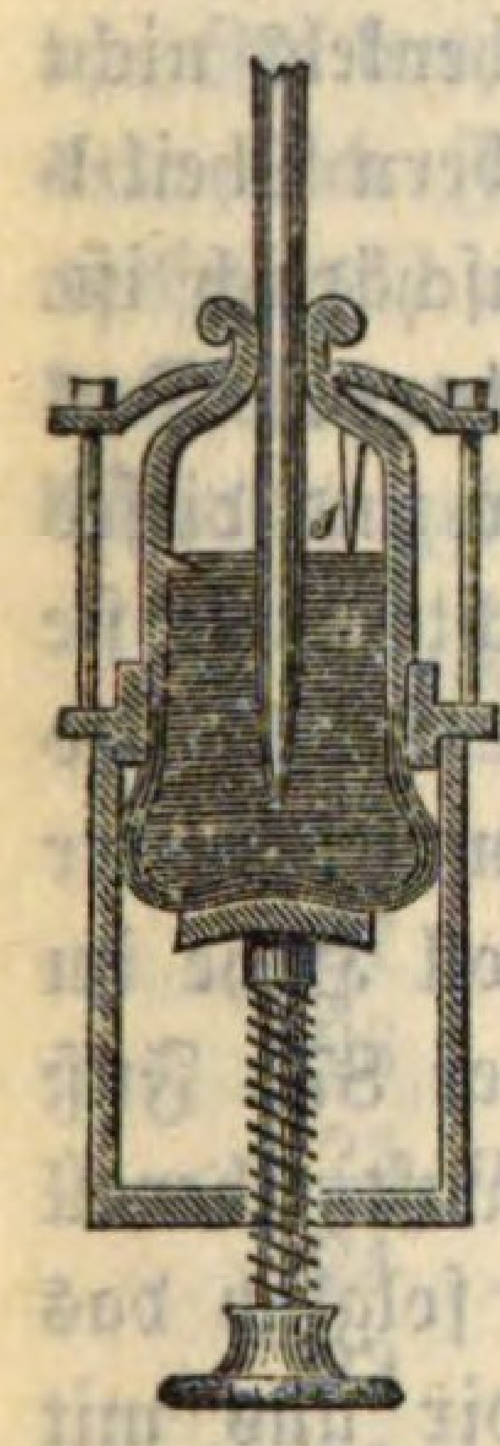
Da die Höhe der Barometersäule, wie im Folgenden näher dargethan werden wird, unter sonst gleichen Verhältnissen in verschiedenen Höhen über dem Meer verschieden ist, so versteht es sich von selbst, daß die Angaben eines Wetterglases nur für eine bestimmte Höhe passen können, und daß daher im Allgemeinen die Skale verrückt werden muß, wenn das Wetterglas an einem andern Ort richtige Witterungsangaben machen soll, so weit dies überhaupt von demselben erwartet werden kann. Liegt der neue Ort höher, so muß die Skale herabgerückt, liegt er tiefer, so muß sie in die Höhe geschoben werden; bei geringen Höhenunterschieden der Orte kann oft schon dadurch geholfen werden, daß man etwas Quecksilber zugießt oder wegnimmt, da eine Erhöhung oder eine

Erniedrigung des Quecksilberniveau's im Gefäß eine entsprechende Veränderung des Spiegels zur Folge hat.

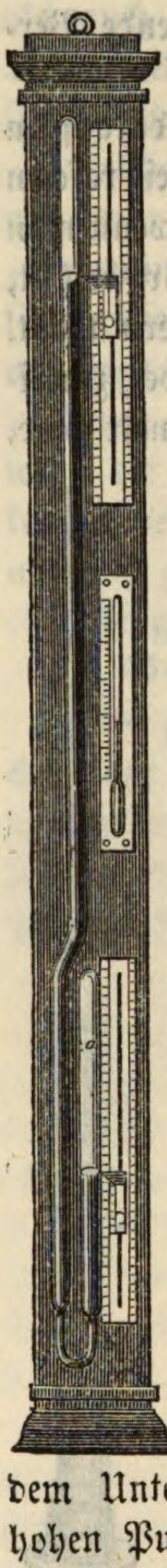
Beim Transportiren eines Barometers hat man sorgfältig darauf zu achten, daß keine Luftbläschen in die Röhre eintreten, was bei raschen Wendungen leicht geschieht. Am sichersten geht man zu Werk, wenn man das Barometer langsam neigt, bis das Quecksilber die ganze Röhre erfüllt, und es dann in dieser geneigten Lage von einem Ort zum andern trägt. Wird das Barometer zu schnell geneigt, so schlägt das Quecksilber zuweilen so stark an die Spitze der Röhre, daß diese dadurch zertrümmert wird.



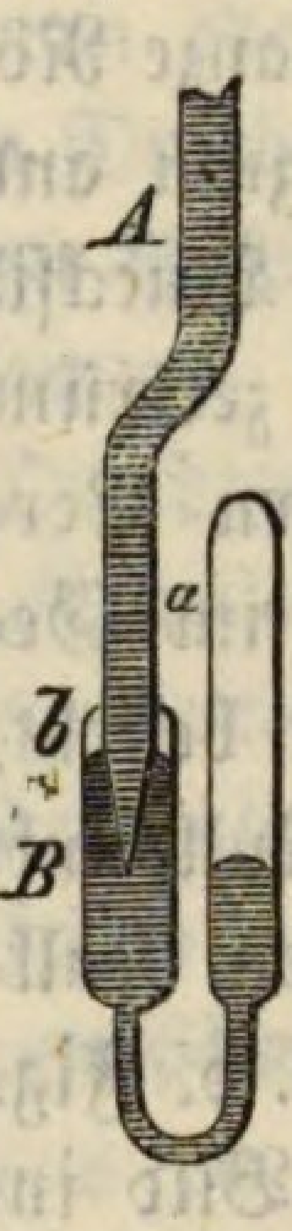
Das **Fortin'sche Barometer** hat unter andern Verbesserungen die Einrichtung, daß der Quecksilberspiegel im Gefäß, dessen Boden aus einem Stück Handschuhleder besteht, mittelst einer Schraube bei jeder Beobachtung auf den Nullpunkt der Skale eingestellt werden kann. Diesen Nullpunkt bildet die untere scharfe Spitze s (s. d. Fig. links) der Skale; wenn diese Spitze ihr Bild im Quecksilberspiegel eben zu berühren scheint, so berührt sie genau die Oberfläche des Quecksilbers im Gefäß, und dann ist diese richtig eingestellt. Um das Barometer leicht tragbar zu machen, gießt man so viel Quecksilber in das Gefäß, daß beim Umkehren der Röhre ihr offenes Ende im Quecksilber eingetaucht bleibt. Das Gefäß ist ganz verschlossen und hat nur auf dem Deckel eine feine Oeffnung, durch welche die Luft Zutritt erhält; beim Umkehren des Barometers muß diese Oeffnung verstopft werden. Wenn das Fortin'sche Barometer als Reisebarometer dienen soll, so ist es seiner ganzen Länge nach in eine messingne Kapsel eingeschlossen, die vorn und hinten nur soweit aufgeschlitzt ist, als die äußersten Barometerstände sich erstrecken können; durch diese Spalten hindurch wird der Stand der Quecksilberkuppe beobachtet.



2) Heberbarometer. Hieher gehört das **Gay-Lussac'sche Barometer.** Dieses Barometer ist zunächst für Reisen bestimmt und daher so eingerichtet, daß es beim Transport nicht so leicht in Unordnung gerathen kann. Zu diesem Zweck sind der kurze und der lange Schenkel desselben durch ein Röhrenstück (s. die umstehende Fig.) verbunden, welches so enge ist, daß selbst beim Umkehren des Barometers kein Luftbläschen durch das Quecksilber hindurch in den längern Schenkel und in die Torricelli'sche Leere gelangen kann. Der kürzere Schenkel ist gewöhnlich



zugeschmolzen und der Luftzutritt nur durch eine feine Oeffnung a gestattet. Bei dem hier abgebildeten Barometer sind an beiden Schenkeln Skalen angebracht; es ist daher bei der Beobachtung des Barometerstandes ein zweimaliges Ablesen erforderlich.



Bunten hat eine weitere sehr sinnreiche Verbesserung daran angebracht; das untere Ende des größern Schenkels A ist in eine Spitze mit einer feinen Oeffnung ausgezogen und von einem weiten Röhrenstück B umschlossen, an welches die enge Verbindungsröhre der beiden Schenkel angeschmolzen ist. Geschieht es nun auch, daß etwa durch starke Stöße Luft durch das enge Röhrchen hindurchdringt, so kann dieselbe durch die enge Oeffnung des langen Schenkels nicht eintreten, und sie wird sich daher in dem obern Theil b der Erweiterung B sammeln, wo sie unschädlich ist.

Höhenmessung mittelst des Barometers. Das Quecksilber ist 13,59 mal schwerer, als das Wasser und dieses ungefähr 770 mal schwerer als Luft von der Dichte, wie sie unmittelbar über dem Meeresspiegel stattfindet. Es ist also Quecksilber 770 . 13,9 oder in runder Zahl 10500 mal schwerer als Luft, so daß eine Quecksilbersäule von 1 Zoll Höhe im Stande ist, einer Luftsäule von 10500 Zoll oder 875 Fuß Höhe das Gleichgewicht zu halten. Hätte die Luft überall dieselbe Dichte, wie am Meeresspiegel, so müßte folglich das Barometer jedesmal um 1 Zoll fallen, so oft wir uns mit demselben um 875 Fuß erheben, und es wäre daher ein Leichtes, aus dem gleichzeitigen Stand des Barometers am Meeresufer und auf einem Berg die Höhe des letztern, oder aus dem Unterschied der gleichzeitigen Barometerstände an zwei verschieden hohen Punkten überhaupt deren Höhenunterschied zu berechnen. Ein Barometerstand von 25 Zoll würde uns z. B. anzeigen, daß wir uns 3 . 875 oder 2625 Fuß über der Meeresfläche befinden, wenn an letzterer gleichzeitig der Normalbarometerstand von 28 Zoll beobachtet würde; stände das Barometer an einem Ort auf 26, an einem andern zu gleicher Zeit auf 21 Zoll Höhe, so würde der Höhenunterschied der beiden Punkte 5 . 875 oder 4375 Fuß betragen.

Nach dem Mariotte'schen Gesetz ist aber die Luft um so dichter, je größer der Druck ist, der auf ihr lastet; daraus folgt, daß die zunächst am Meeresspiegel befindliche Luftschicht die größte Dichte besitzt, und daß die Luft in höheren Schichten um so weniger dicht ist, je größer der senk-

rechte Abstand zwischen diesen und dem Meeresspiegel ist. Während daher unmittelbar über dem Meeresspiegel eine ungefähr 875 Fuß hohe Säule Luft hinreicht, um eine Quecksilbersäule von 1 Zoll Höhe zu tragen, bedarf es in der Höhe, wo die Luft nur noch halb so dicht ist, einer doppelt so großen Luftsäule, um jener Quecksilbersäule das Gleichgewicht zu halten u. s. f. Es muß daher einem Fallen des Barometers um 1 Zoll eine um so größere Erhebung entsprechen, in je größerer Höhe die Messung vorgenommen wird.

Wenn schon durch diese nach oben abnehmende Dichte der Luft die Höhenbestimmung nach Barometerbeobachtungen erschwert wird, so treten außerdem noch anderweitige Umstände, wie namentlich der Einfluß der nach oben abnehmenden Temperatur auf die Dichte der Luft, hinzu, welche diese Berechnungen verwickelter machen.

In der folgenden Tabelle sind annähernd die Höhen angegeben, die den nach Zollen abnehmenden Barometerständen entsprechen, vom Meeresspiegel an bis zu der höchsten bis jetzt erreichten Erhebung über demselben. Bei der Berechnung derselben ist die Normaltemperatur zu Grunde gelegt.

Quecksilberhöhe in Par. Zollen.	Höhe über dem Meer in Par. Fußen.	Quecksilberhöhe in Par. Zollen.	Höhe über dem Meer in Par. Fußen.
28	0	18	10860
27	890	17	12270
26	1820	16	13760
25	2790	15	15350
24	3790	14	17050
23	4840	13	18870
22	5930	12	20850
21	7070	11	22990
20	8270	10	25530.
19	9530		

Aus dieser Tabelle ersehen wir, daß schon die erste Erhebung, die einem Sinken des Barometers um 1 Zoll entspricht, nicht 875, sondern 890 Fuß, und von der dritten auf die vierte Station schon 1000 Fuß beträgt; in einer Höhe von ungefähr 15000 Fuß ist die doppelte, und in einer Höhe von 23000 fast die dreifache Erhebung von der am Meeresspiegel erforderlichen nöthig, um das Barometer um 1 Zoll fallen zu machen.

In Städten, die nicht hoch über dem Meeresspiegel liegen, wie Petersburg (106′ über dem Meer), Berlin (115′), Paris (116′), ist nach dieser Tabelle der mittlere Barometerstand nahezu 28″; in Stuttgart (837′), Karlsbad (1176′) ungefähr 27″; in München (1658′), Bern (1792′), Chur (1836′) 26″; in Einsiedeln (2850′), auf dem Semmeringpaß (2944′)

25″; auf dem Scheideckpaß (5996′) 22″, auf der Jungfrau (12870′) 17″, auf dem Montblanc (14800′) 15½″, auf dem Chimborazo (20148′) 12″, auf dem Dhawalagiri (26340′) 10″ u. s. w.

In der Luft schwebende Körper.

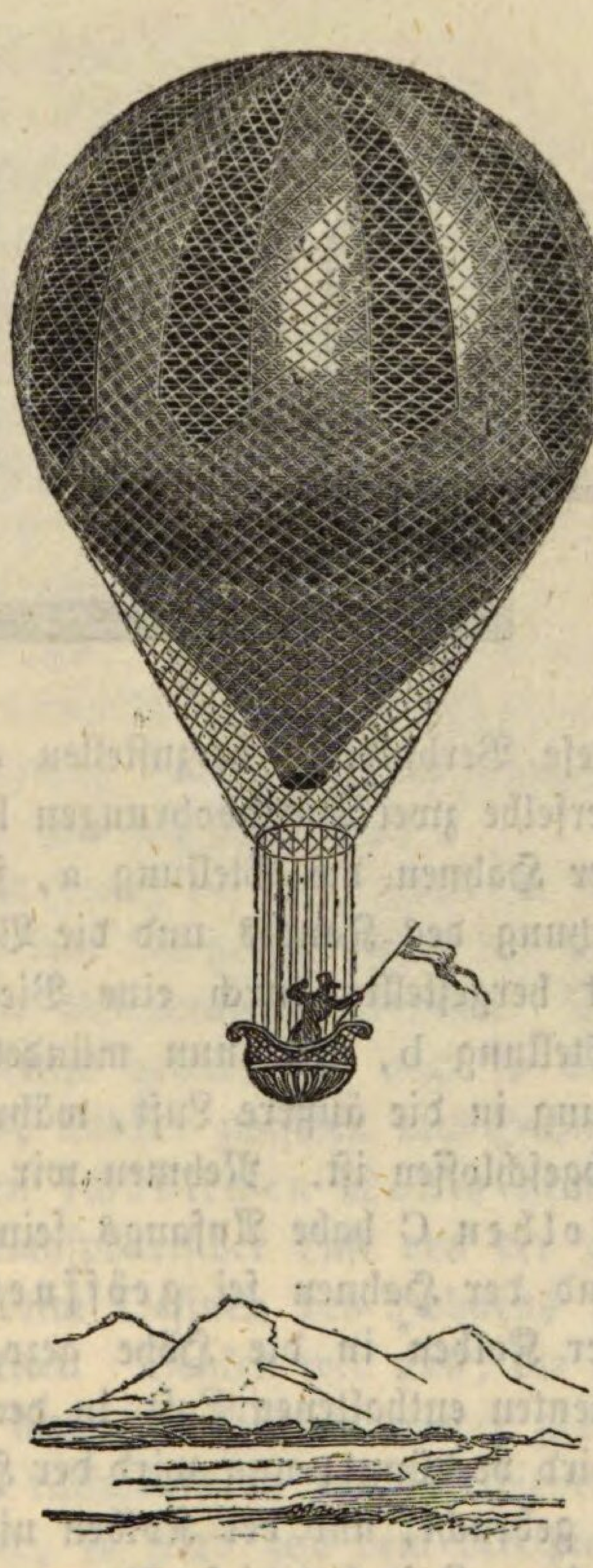
Das Archimedische Gesetz, daß ein in Wasser untergetauchter Körper so viel von seinem Gewichte verliert, als das Gewicht des verdrängten Wasservolumens beträgt, ist auch auf Körper anwendbar, welche in der Luft schwimmen. Jeder in der Luft befindliche Körper wird sonach mit einer Kraft gehoben gleich dem Gewicht der von ihm verdrängten Luft; ist das Gewicht des Körpers selbst größer als diese Kraft, so fällt er nieder; ist es kleiner, so steigt er in die Höhe; sind endlich beide Gewichte gleich groß, so ist er im Gleichgewicht, d. h. er **schwebt** in der Luft.

Ein in der Luft schwebender Körper kann nur in einer bestimmten Höhe im Gleichgewicht sein; sobald er steigt, so kommt er in weniger dichte, und wenn er sinkt, in dichtere Luftschichten, für welche die Bedingung seines Gleichgewichts aufgehoben ist.

Wenn wir Seifenblasen machen, so füllen wir dieselben mit erwärmter Luft aus unserem Körper; diese ist leichter, als die äußere kältere Luft. Fügen wir dem Gewicht der Luft in der Blase noch das der dünnen Kugelwand, die aus Seifenlösung besteht, hinzu, so ist die Summe beider entweder größer, oder eben so groß, oder kleiner als das Gewicht des verdrängten Luftvolumens; daher fallen manche Blasen zu Boden, andere erhalten sich in der Schwebe da, wo sie entstanden sind, und noch andere steigen in die Höhe.

Auch Wolken, Dampf und Rauch heben oder senken sich in der Luft, je nachdem ihr spezifisches Gewicht kleiner oder größer ist, als das der atmosphärischen Luft.

Luftballone oder **Aerostaten** steigen ebenfalls wegen ihrer großen Leichtigkeit in der Luft in die Höhe. Der erste Luftballon wurde im Jahr 1782 von dem Franzosen Montgolfier verfertigt. Seine Luftballone, nach ihm Montgolfieren genannt, bestanden aus Papier und waren mit erhitzter Luft gefüllt; für größere Fahrten mußte daher eine ziemlich große Menge Brennmaterial mit auf die Reise genommen werden. Charles, Professor in Paris, ersetzte die erwärmte Luft durch Wasserstoffgas, das ungefähr 14mal leichter ist, als atmosphärische Luft, und statt des Papiers nahm er zur Hülle mit Firniß getränkten Taffet. Die nach seinem Prinzip verfertigten Aerostaten nennt man Charlieren; sie sind viel kleiner, als die Montgolfieren, und haben überdies den Vorzug, daß die Feuersgefahr beseitigt ist. Der Ballon ist ganz geschlossen und nur oben mit einer Klappe versehen, die der Luftschiffer



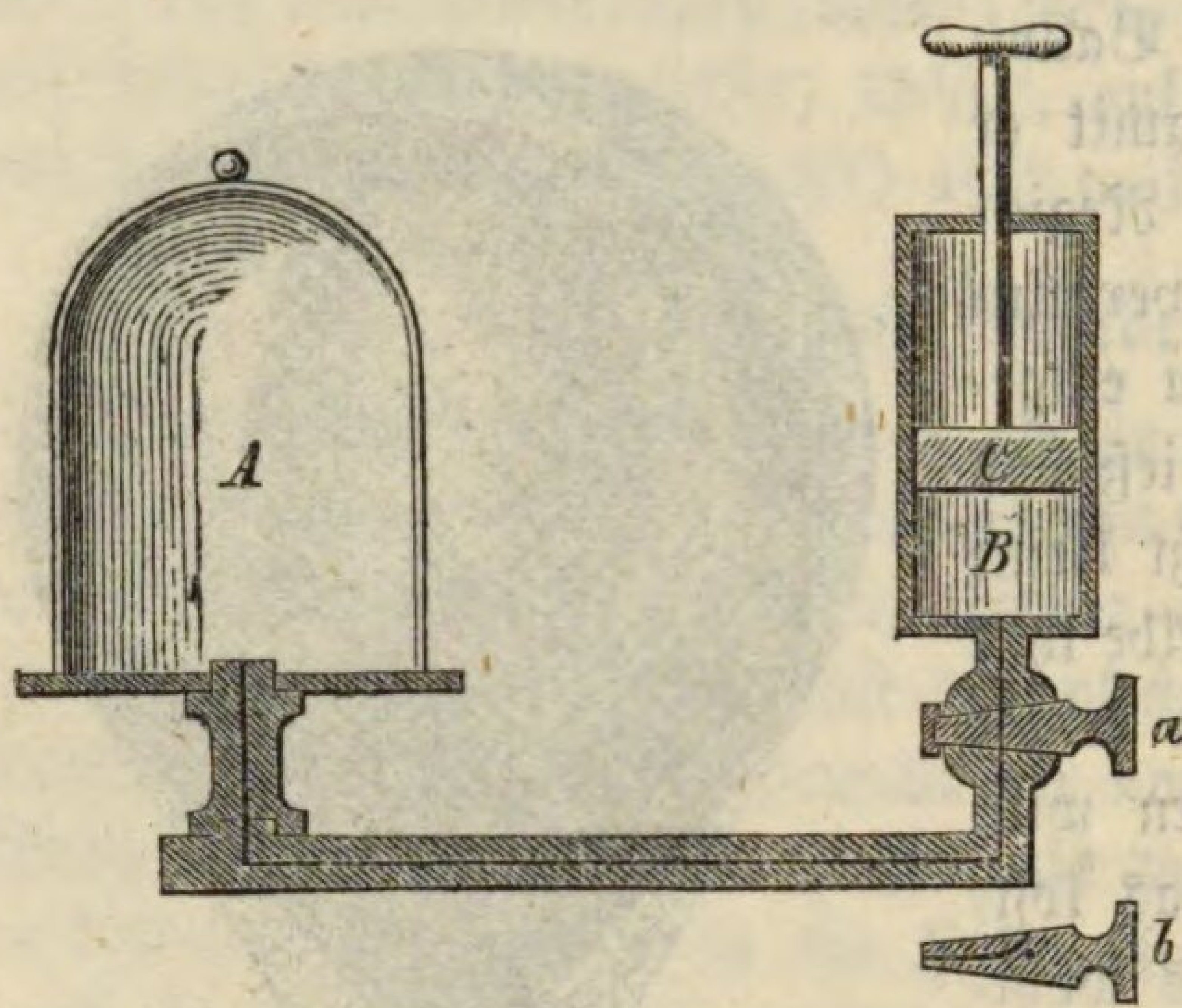
öffnen kann. Anfangs wird der Ballon nicht ganz mit Gas gefüllt, damit er nicht zerplatzt, wenn in höhern Regionen der äußere Luftdruck sich vermindert; um dieser Gefahr sicher zu entgehen, öffnet der Luftschiffer überdieß von Zeit zu Zeit die Klappe und läßt kleine Mengen Gas ausströmen. Dasselbe thut er in größeren Portionen, wenn er die Rückreise zum Erdboden antreten will. In neuerer Zeit hat Green das kostspielige Wasserstoffgas durch das wohlfeilere Kohlenwasserstoffgas — dasselbe, welches zur Gasbeleuchtung gebraucht wird — ersetzt, obgleich es 13,6 mal so schwer ist (s. die Tabelle S. 48) als jenes und daher größere Ballone erfordert.

Die erste Luftfahrt in einer Montgolfiere, von 74 Fuß Höhe, 48 Fuß Querdurchmesser und einem Gewicht von 1600 Pfd. haben am 21. Nov. 1783 Pilâtre de Rozier und der Marquis von Arlandes unternommen. Charles machte mit Robert seine erste Luftreise am 1. Dez. desselben Jahrs. Die höchste Region, bis zu welcher sich je ein Mensch in der Luft erhoben hat, erreichte Gay-Lussac in einer Charliere im Jahr 1804; die Höhe, bis zu welcher er aufflog, betrug 7000 Meter oder beinahe eine deutsche Meile. Die meisten Reisen dieser Art, ungefähr 500 an der Zahl, hat bis jetzt der schon genannte englische Luftschiffer Green gemacht, und unter seinen Fahrten ist die berühmteste die vom Jahr 1839, wo er den Weg von London nach Koblenz in 24 Stunden zurücklegte. Die hier beigefügte Zeichnung stellt einen Green'schen Luftballon vor.

Mittel zur Verdünnung und Verdichtung der Luft.

1. Die Luftpumpe.

Mittelst der **Luftpumpe** gelingt es, die Verdünnung der Luft in einem luftdicht verschlossenen Gefäß so zu steigern, daß dieses als luftleer betrachtet werden kann. Sie wurde im Jahr 1650 von Otto von Guericke, Bürgermeister zu Magdeburg, erfunden und bald darauf von den Engländern Hook und Boyle wesentlich verbessert. Das Gefäß,



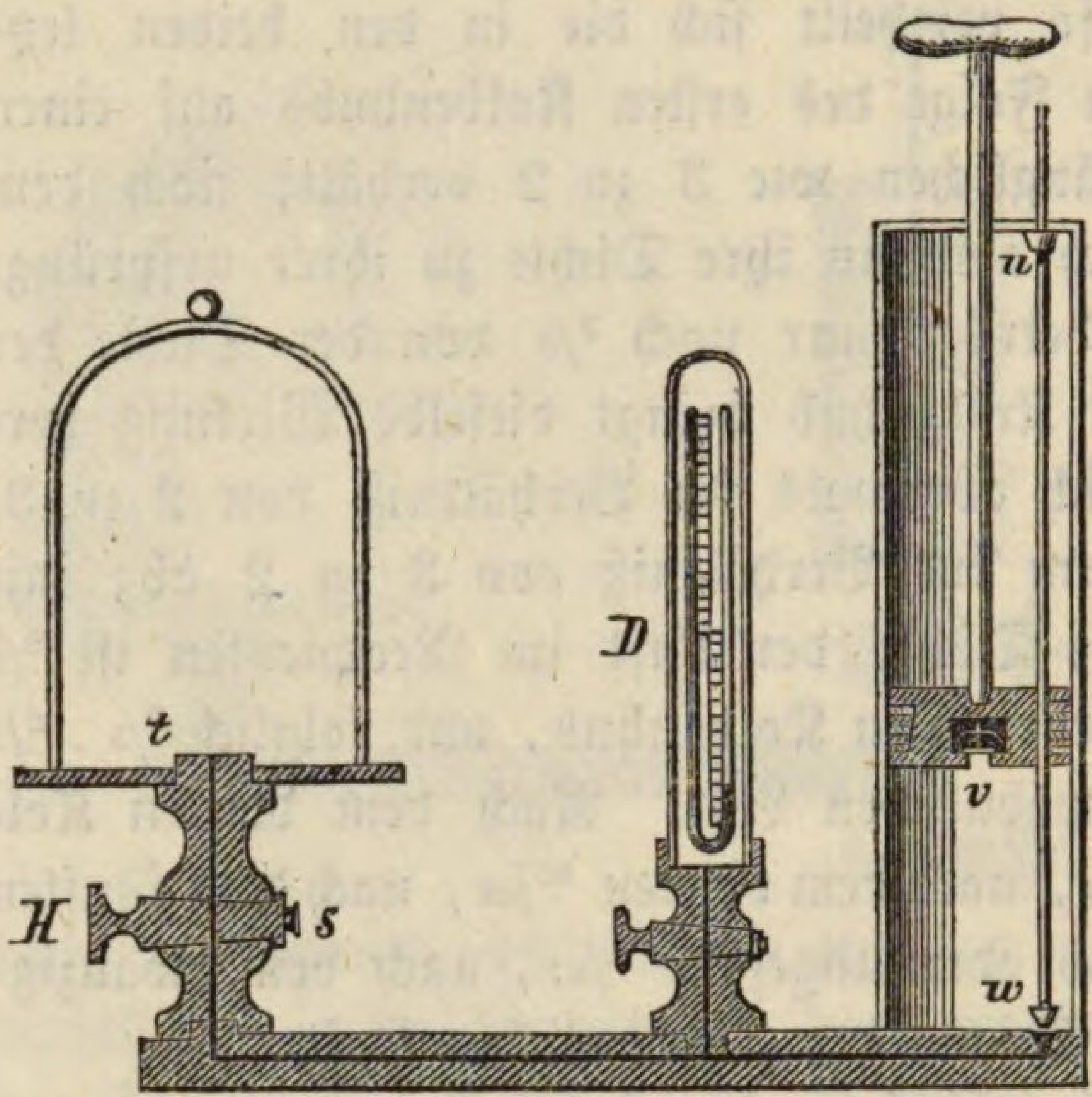
aus dem die Luft entfernt werden soll, besteht gewöhnlich in einer Glasglocke A, dem sogenannten **Recipienten**, welcher auf einem polirten metallenen Teller mittelst Talg luftdicht aufgesetzt wird und durch einen geschlossenen Kanal mit einem Pumpencylinder B, dem **Stiefel**, in Verbindung gebracht werden kann. Ein Hahnen a (b) dient dazu, diese Verbindung herzustellen oder zu unterbrechen, zu welchem Zweck derselbe zwei Durchbohrungen hat, welche beide in b sichtbar sind. Hat der Hahnen die Stellung a, so bildet die Querdurchbohrung die Fortsetzung des Kanals und die Verbindung zwischen Stiefel und Recipient ist hergestellt; durch eine Viertelsdrehung gibt man dem Hahnen die Stellung b, und nun mündet der Stiefel durch die Längendurchbohrung in die äußere Luft, während gegen den Recipienten hin der Kanal abgeschlossen ist. Nehmen wir an, der im Stiefel luftdicht anschließende **Kolben** C habe Anfangs seine tiefste Stellung am Boden des Stiefels und der Hahnen sei **geöffnet**, d. h. er habe die Stellung a. Wird der Kolben in die Höhe gezogen, so dringt ein Theil der im Recipienten enthaltenen Luft in den Stiefel und die Luft im ganzen Raum wird verdünnt; nun wird der Hahnen **geschlossen**, d. h. in die Stellung b gebracht, und der Kolben niedergedrückt: auf die im Recipienten enthaltene Luft hat diese Bewegung des Kolbens keinen Einfluß, die Luft im Stiefel aber, in welchen mit der Oeffnung des Hahnens auch äußere Luft eindringt, wird sammt dieser durch die Längendurchbohrung ausgestoßen. Der Hahnen wird jetzt wieder geöffnet, und der Kolben in die Höhe gezogen; dadurch wird der noch in A zurückgebliebenen Luft wiederum ein vergrößerter Raum geboten, den sie augenblicklich in gleichförmiger Vertheilung erfüllt; die Folge davon ist eine neue Verdünnung der in A befindlichen Luft. Eine zweite Schließung des Hahnens und ein zweiter Niedergang des Kolbens bewirkt, daß die von A nach B übergeströmte Luft abermals in die äußere Luft austritt. Wird in dieser Weise fortgefahren, so kann zwar die im Recipienten enthaltene Luft nie ganz entfernt werden, und es wird also kein vollkommen luftleerer Raum darin entstehen, aber die Verdünnung derselben kann immerhin auf einen sehr hohen Grad getrieben werden.

Es sei der Raumgehalt des Stiefels gleich der Hälfte von dem der

Glasglocke und des Kanals, so vertheilt sich die in den beiden letzten Räumen enthaltene Luft in Folge des ersten Kolbenhubs auf einen Raum, der sich zu ihrem anfänglichen wie 3 zu 2 verhält; nach dem Mariotte'schen Gesetz verhält sich alsdann ihre Dichte zu ihrer ursprünglichen, wie 2 zu 3, d. h. sie beträgt nur noch $^2/_3$ von der Dichte der gewöhnlichen Luft. Ein zweiter Kolbenhub bringt dieselbe Wirkung hervor: das Volumen vermehrt sich abermals im Verhältniß von 2 zu 3, und die Dichte nimmt wiederum im Verhältniß von 3 zu 2 ab; mit andern Worten: die nunmehrige Dichte der Luft im Recipienten ist $^2/_3$ von der Dichte derselben nach dem ersten Kolbenhub, und folglich $^2/_3 \cdot {}^2/_3$ oder $^4/_9$ von der Dichte der gewöhnlichen Luft. Nach dem dritten Kolbenhub ist sie $^2/_3 \cdot {}^2/_3 \cdot {}^2/_3 = {}^8/_{27}$, nach dem vierten $^{16}/_{81}$, nach dem fünften $^{32}/_{243}$, nach dem zehnten $^{1024}/_{59049}$ oder ungefähr $^1/_{57}$, nach dem zwanzigsten weniger als $^1/_{3000}$ von der Dichte der gewöhnlichen Luft.

Auf diesen Grad der Verdünnung kann jedoch die Luft selbst mit der besten Luftpumpe nicht gebracht werden; das Aeußerste, was bis jetzt erreicht wurde, ist eine 800 bis 1000fache Verdünnung derselben. Die Hauptursache, daß hier eine so nahe Grenze gesteckt ist, liegt in dem Umstand, daß derjenige Theil des Kanals, welcher zwischen dem Hahnen und dem Stiefel liegt, und den man den schädlichen Raum nennt, nach dem Niedergang des Kolbens mit atmosphärischer Luft von der gewöhnlichen Dichte gefüllt bleibt, die sich beim Oeffnen des Hahnens im übrigen Kanal und im Recipienten verbreitet. Denken wir uns, die im schädlichen Raum enthaltene Luft ströme, wenn der Hahnen wieder geöffnet und der Kolben gehoben wird, nicht rückwärts in den Recipienten, sondern ausschließlich in den Stiefel über, so wird aus dem Recipienten nur dann noch Luft in den Stiefel eintreten, wenn dieselbe noch dichter ist, als die im Stiefel schon vorhandene. Sobald aber die Verdünnung im Recipienten den Grad erreicht hat, daß die Spannung der verdünnten Luft derjenigen gleich kommt, welche die im Stiefel vertheilte Luft des schädlichen Raums besitzt, so ist die Grenze der Verdünnung erreicht, da aus dem Recipienten keine Luft mehr in den Stiefel eindringen kann. Diese Grenze ist leicht zu ermitteln: so viel mal der Raumgehalt des Stiefels größer ist, als der schädliche Raum, so viel mal wird unter der obigen Voraussetzung die gewöhnliche Luft des schädlichen Raums verdünnt, und der gleiche Grad der Verdünnung kommt daher auch der im Recipienten enthaltenen Luft zu. Wäre also z. B. der Raumgehalt des Stiefels das 600fache des schädlichen Raums, so könnte die Luft mittelst einer solchen Luftpumpe nur auf $^1/_{600}$ der Dichte der gewöhnlichen Luft gebracht werden.

Um den Grad der Verdünnung der Luft, welche durch eine Anzahl



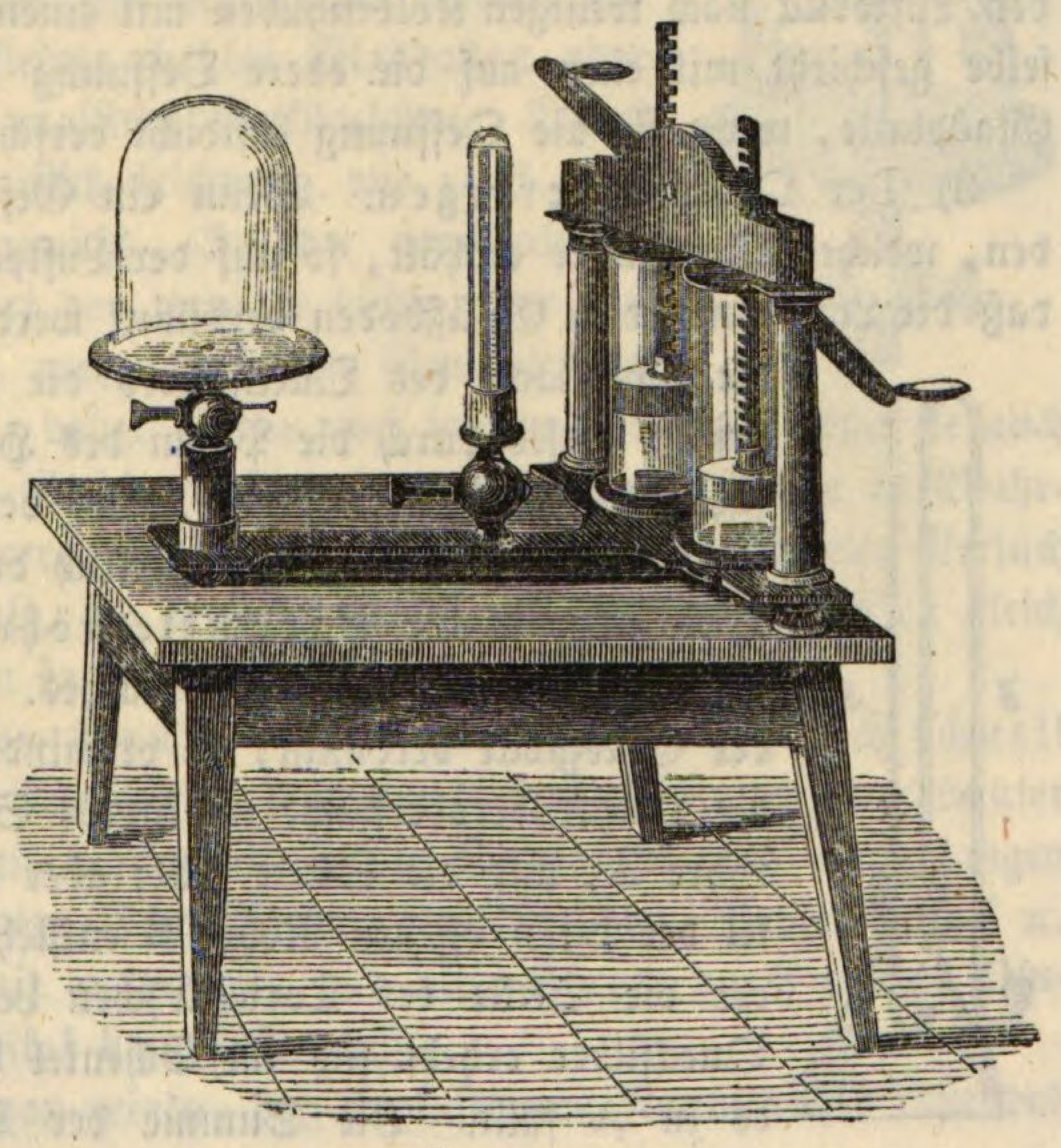
Kolbenhübe hervorgebracht wird, messen zu können, ist an der Luftpumpe gewöhnlich eine sogenannte Barometerprobe angebracht. Eine solche ist in unserer Zeichnung abgebildet. Sie besteht aus einer zweischenkligen Röhre, deren einer Schenkel geschlossen und mit Quecksilber gefüllt ist. Das Quecksilber wird, wie beim Barometer, durch den Druck der Luft, die durch den offenen Schenkel eintritt, getragen. So lange sich in der Glasglocke D, in welche die Röhre luftdicht eingeschlossen ist, Luft von der gewöhnlichen Dichte befindet, so lange füllt das Quecksilber den geschlossenen Schenkel ganz aus, da die Höhe desselben nur 6—8″ beträgt. Wird aber durch Oeffnen des unten angebrachten Hahnen die Barometerprobe mit dem Hauptkanal zwischen Recipient und Stiefel in Verbindung gebracht, so sinkt, sobald durch Auspumpen die Luft bis zu einem gewissen Grad verdünnt worden ist, das Quecksilber im geschlossenen Schenkel herab und erhebt sich im offenen. Wäre es möglich, die Räume der Luftpumpe vollkommen luftleer zu machen, so müßten endlich die beiden Quecksilbersäulen gleiche Höhe erreichen; da dieß aber nicht möglich ist, so bleibt zwischen beideu stets ein kleiner Unterschied. Beträgt dieser z. B. noch 1 Millimeter, also $^1/_{760}$ der normalen Barometerhöhe, so ist die Spannung der verdünnten Luft $^1/_{760}$ von der Spannung der Atmosphäre.

Die vorhergehende Zeichnung zeigt auch eine verbesserte Einrichtung des Kolbens, der hier nicht massiv, sondern hohl, und mit einem Ventil v versehen ist, das durch eine Feder leicht angedrückt wird. Der Hahnen ist hier durch ein Kegelventil w ersetzt, das den Boden des Cylinders vom Kanal abschließt, sobald der Kolben niedergeht, indem die Stange, an der es befestigt ist, mit leichter Reibung durch den Kolben hindurch geht. Bei der Hebung des Kolbens wird die Stange mitgenommen und das Ventil geöffnet; der Stöpsel u, der auf der Ventilstange befestigt ist, stößt jedoch so zeitig gegen den obern Boden, daß das Ventil nur ganz wenig von seiner Oeffnung im Boden des Stiefels sich entfernen kann. Auch bei dieser Einrichtung ist ein schädlicher Raum vorhanden; das Ventil v, auf das von oben der äußere Luftdruck wirkt,

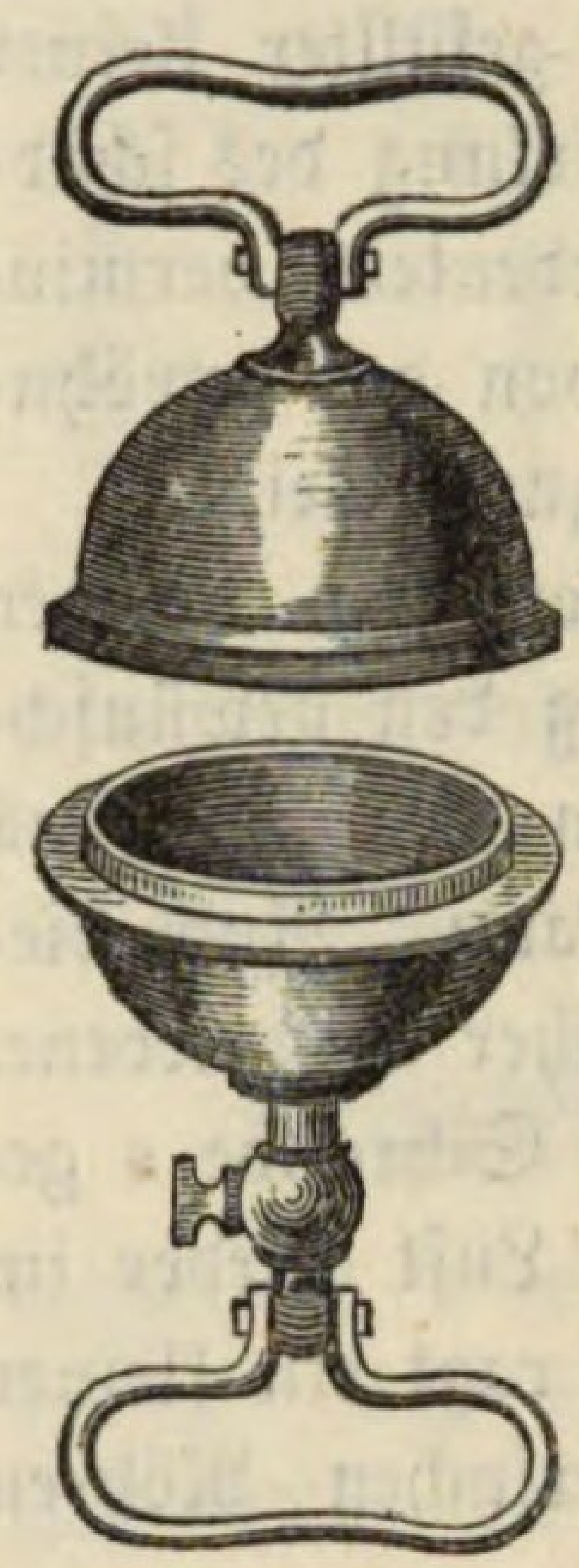
öffnet sich erst dann, wenn die unter demselben befindliche Luft eine höhere Spannung hat als die Atmosphäre; wenn also der Kolben auch sehr genau an den Boden des Cylinders sich anschließt, so bleibt doch immer eine sehr dünne Luftschicht dazwischen und namentlich zunächst unter dem Kolbenventil ein mit Luft von der gewöhnlichen Dichte gefüllter kleiner Raum. Der französische Physiker **Babinet** hat die Wirkung des schädlichen Raumes durch eine sehr sinnreiche Vorrichtung bedeutend vermindert, indem durch dieselbe bewirkt wird, daß statt Luft von der gewöhnlichen Spannung nur sehr verdünnte Luft in demselben zurückbleibt.

Der Hahnen H hat den Zweck, den Recipienten von dem übrigen Theil der Maschine abzuschließen, sobald die Verdünnung den gewünschten Grad erreicht hat, da selbst bei der bestgearbeiteten Maschine das Eindringen kleiner Mengen Luft nicht verhütet werden kann. Auch dieser Hahnen hat eine doppelte Durchbohrung, wie der früher beschriebene. Die Längendurchbohrung ist aber gewöhnlich durch eine Schraube s geschlossen, die erst dann geöffnet wird, wenn die äußere Luft wieder im Recipienten zugelassen werden soll. — Ueber dem Teller ragt ein kleiner Schraubenhals t hervor, auf welchen zu manchen Versuchen Röhren u. dergl. aufgeschraubt werden.

Wenn die Verdünnung der Luft in der Pumpe einen gewissen Grad erreicht hat, so gehört eine nicht geringe Anstrengung dazu, den Kolben zu heben, da hiebei der Ueberschuß des äußern Luftdrucks auf den Kolben über den von unten auf denselben wirkenden Druck der verdünnten Luft zu überwinden ist. Bei Luftpumpen mit 2 Stiefeln wie sie gewöhnlich angewendet werden, ist dieser Uebelstand gehoben und zugleich geht die Arbeit doppelt so rasch von Statten. Eine solche doppelt wirkende Luftpumpe ist hier abgebildet. Die Kolbenstangen sind gezahnt, und werden durch ein ebenfalls gezahntes Rad, das durch



einen mit Handhaben versehenen Hebelarm hin und her gedreht wird, auf und nieder gezogen. Der Widerstand der Luft, der beim Heben des einen Kolbens zu überwinden ist, wird durch den Druck, den die Luft auf den niedergehenden Kolben ausübt, ausgeglichen.

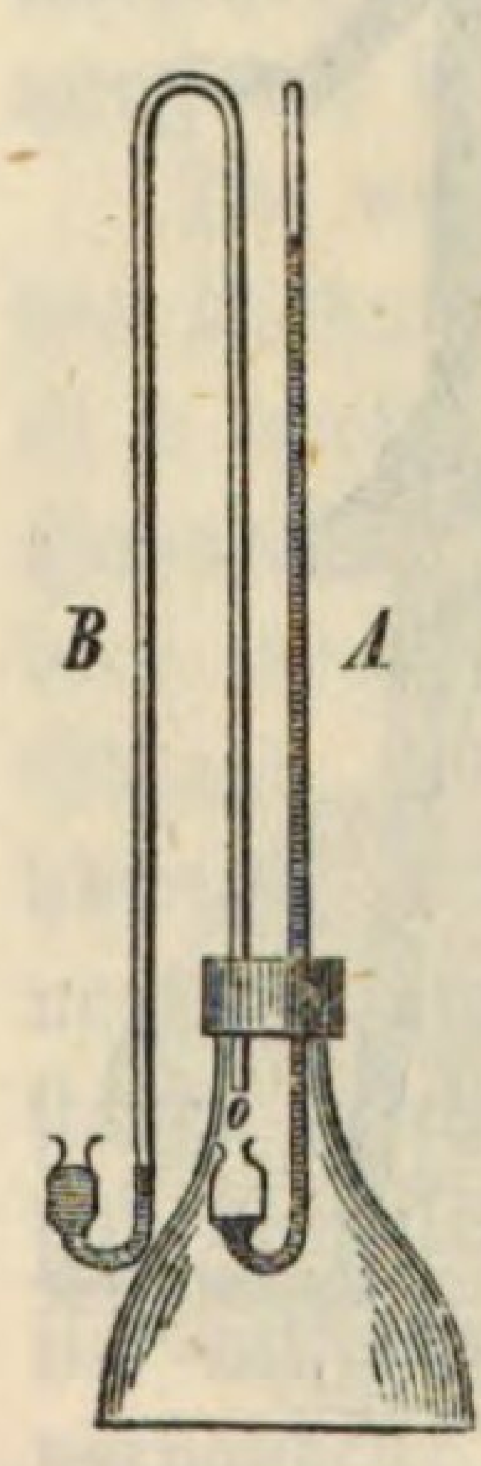


Die gewöhnlichen Versuche, welche mit der Luftpumpe angestellt werden, sind folgende:

1) Die Magdeburger Halbkugeln. Zwei messingene hohle Halbkugeln passen sehr genau aufeinander, und geben einen luftdichten Verschluß, wenn sie, an ihren Rändern mit Fett oder Talg beschmiert, an einander gedrückt werden. Pumpt man hierauf die Luft aus, indem man sie nach Wegnahme der einen Handhabe auf den Teller der Luftpumpe schraubt, so können sie nur mit großer Gewalt wieder getrennt werden. Otto von Guerike machte zuerst diesen Versuch; die Halbkugeln, welche er 1654 vor Kaiser Ferdinand III. auf dem Reichstag zu Regensburg zeigte, hatten über 2 Fuß Durchmesser und konnten durch 24 Pferde nicht aus einander gerissen werden.

2) Das Blasensprengen. Wenn ein starker, auf beiden Seiten offener Glascylinder auf den Teller der Luftpumpe gesetzt, und über die obere Oeffnung desselben eine Blase gespannt wird, so zerplatzt diese durch den Luftdruck nach wenigen Kolbenhüben mit einem heftigen Knall. Dasselbe geschieht mit einer auf die obere Oeffnung des Cylinders gelegten Glasplatte, wenn sie die Oeffnung luftdicht verschließt.

3) Der Quecksilberregen. Wenn ein Gefäß mit hölzernem Boden, welches Quecksilber enthält, so auf der Luftpumpe angebracht wird, daß die Luft unter dem Gefäßboden verdünnt werden kann, während auf die Oberfläche des Quecksilbers die äußere Luft drückt, so dringt dieses durch die Poren des Holzes und fällt in unzähligen Tröpfchen auf den Teller der Luftpumpe.



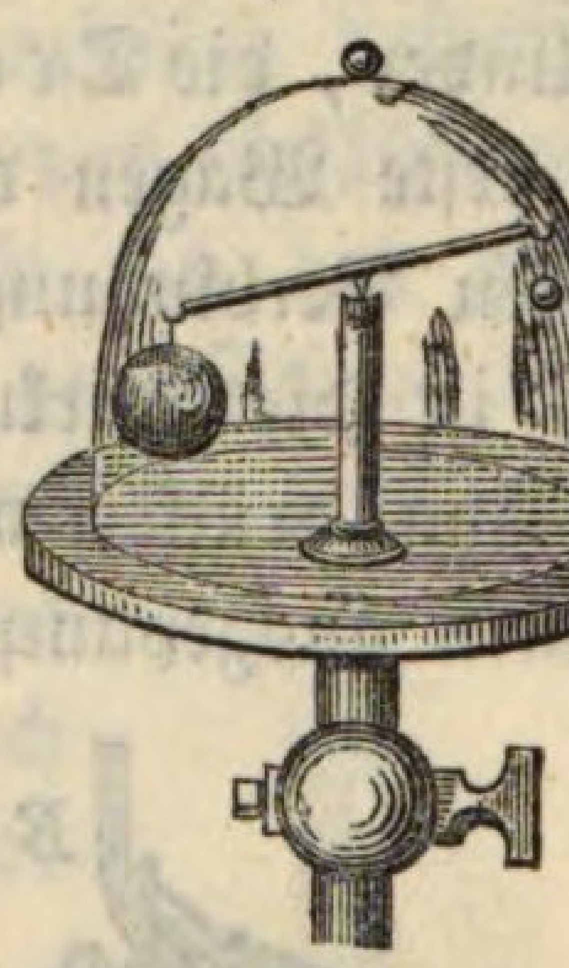
4) Um zu zeigen, daß wirklich die Luft es ist, die das Quecksilber in die Barometerröhre drückt, bedient man sich des hier abgebildeten Gerätes. Wird die Luft unter der Glasglocke verdünnt, so vermindert sich ihr Druck auf die Quecksilberoberfläche im kurzen Schenkel der Barometerröhre A, und die Säule fällt; aber auch im langen Schenkel der bei o offenen Röhre B entsteht ein luftleerer Raum, der die Stelle der Toricelli'schen Leere vertritt, und das Quecksilber erhebt sich im Schenkel B gerade so hoch, als es in A fällt. Die Summe der Quecksilbersäulen in A

und B gibt die Höhe der dem herrschenden Luftdruck entsprechenden Barometersäule. Hat z. B. die Luft unter der Glocke noch eine Spannkraft, der eine Quecksilbersäule von 1 Zoll entspricht, so wird das Quecksilber in A bis auf 1 Zoll Höhe herabsinken; das Quecksilber in B wird aber um 1 Zoll niedriger stehen, als es in A vor dem Versuch stand, weil über derselben nicht ein vollkommen luftleerer Raum, sondern eine Luft sich befindet, die den Druck einer Quecksilbersäule von 1 Zoll Höhe ersetzt.

5) Wasser siedet bei vermindertem Luftdruck bei niedriger Temperatur. Laues Wasser, das man in einem Glase unter den Recipienten der Luftpumpe stellt, kommt bei raschem Pumpen alsbald in heftiges Sieden.

6) Eine Blase schwillt auf, wenn sie, eine ganz geringe Menge Luft enthaltend, zugebunden unter den Recipienten gelegt und in diesem die Luft verdünnt wird. Sobald nämlich die Luft im Recipienten eine geringere Spannkraft hat, als die Luft in der Blase, so dehnt sich diese aus und füllt endlich die ganze Blase; wenn die äußere Luft wieder zugelassen wird, so schrumpft die Blase ebenso schnell wieder zusammen.

7) Die Wage unter dem Recipienten. Eine Wage, die in der gewöhnlichen Luft im Gleichgewicht ist, verliert dasselbe, sobald sie unter den Recipienten gebracht und hier die Luft verdünnt wird, wenn nämlich die an ihr in's Gleichgewicht gebrachten Körper sehr verschiedene Dichte haben, wie z. B. ein kleiner hohler Glasballon oder ein Korkstück und ein massives Bleikügelchen. Dabei gewinnt stets der spezifisch leichtere, wie z. B. das Korkstück, das Uebergewicht. In der gewöhnlichen Luft abgewogen verliert der weniger dichte, der das größere Volumen hat, mehr an seinem Gewicht, als der spezifisch schwerere; daher ist von zwei solchen Körpern, wenn sie auch an der Wage sich das Gleichgewicht halten, der weniger dichte in Wahrheit der absolut schwerere, wie es sich durch den eben genannten Versuch in sehr verdünnter Luft, wo der Gewichtsverlust auf beiden Seiten gleich Null betrachtet werden kann, augenscheinlich zeigt.



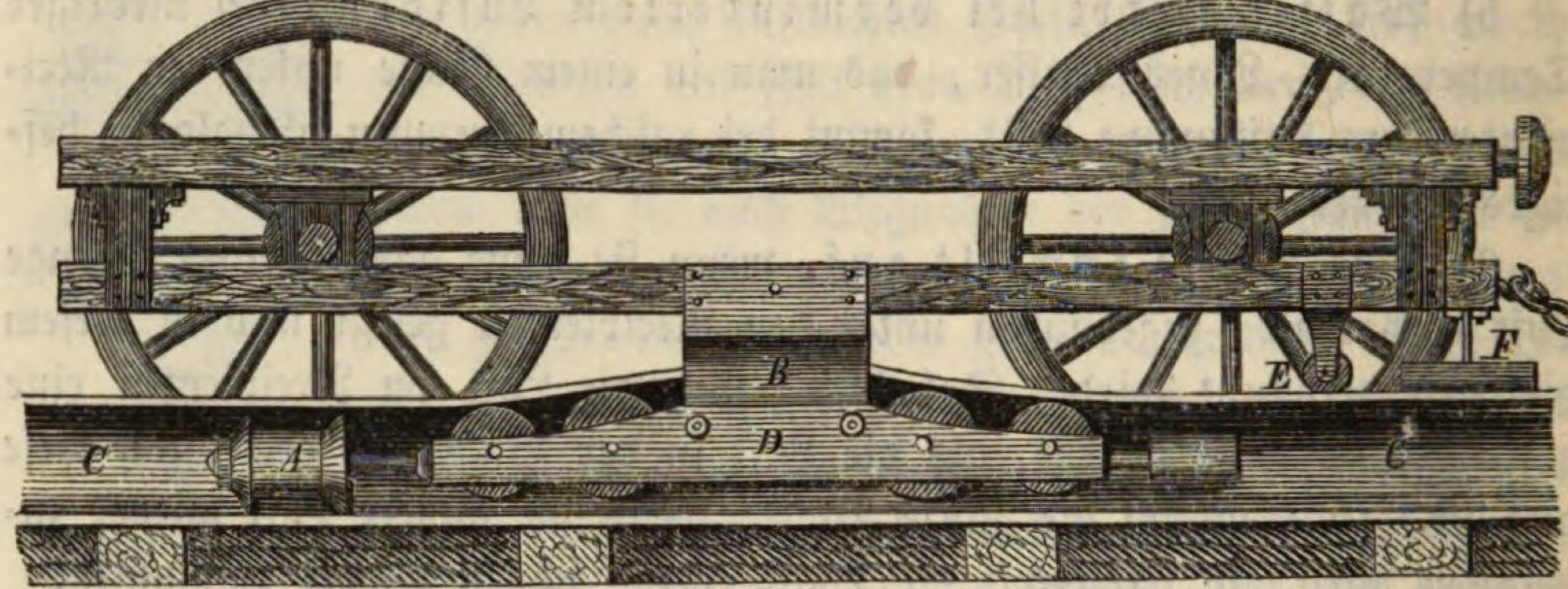
8) Im luftleeren Raum fallen alle Körper gleich schnell (s. Buch I. S. 89). Annähernd läßt sich dieß auch in sehr verdünnter Luft nachweisen, wenn man mittelst der Luftpumpe aus einer langen Röhre, in welcher einige Schrotkörner, Korkkügelchen, Papierschnitzel 2c. enthalten sind, die Luft auspumpt, und diese Körper durch rasches Umkehren der Röhre vertikal herabfallen läßt.

9) Endlich kann man zeigen, daß im luftleeren Raum nichts Lebendes

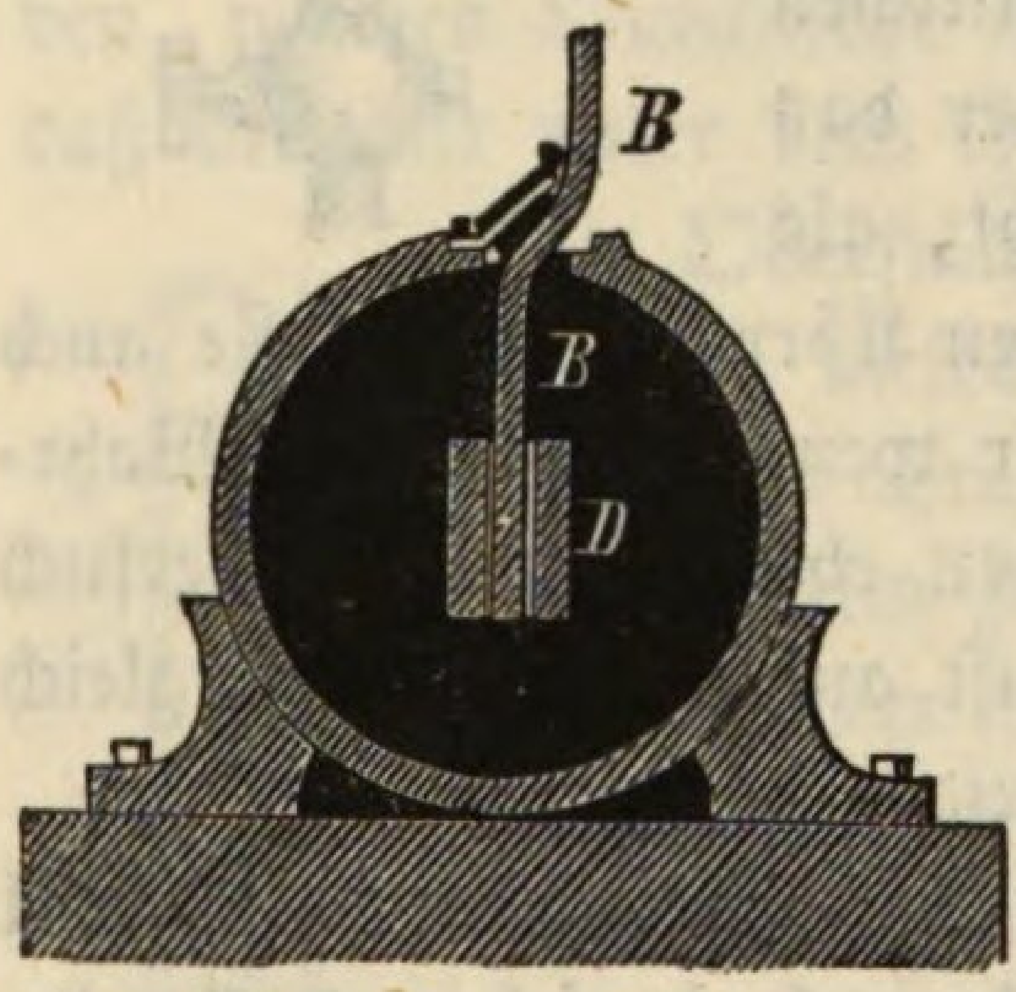
bestehen kann: kleine Thiere, unter den Recipienten gebracht, sterben nach einiger Zeit, wenn die Verdünnung auf einen hohen Grad gebracht wird; ebenso macht der Mangel an Sauerstoff, daß ein Licht erlischt u. s. f.

Die atmosphärische Eisenbahn.

Bei der **atmosphärischen Eisenbahn** wird der Luftdruck zur Bewegung der Wagenzüge benutzt. Die erste Bahn dieser Art haben die Engländer Klegg und Samuda in Irland ausgeführt. In der



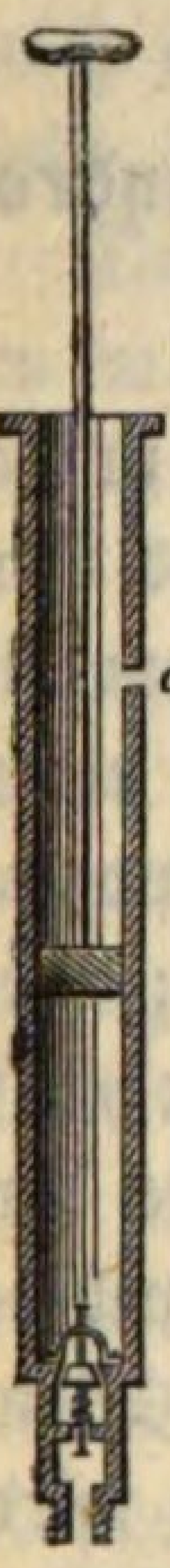
Mitte zwischen den Radschienen liegt in der ganzen Länge der Bahn ein großer, aus 6—8 Fuß langen Stücken zusammengesetzter, gußeiserner Cylinder, die Treibröhre, in welchem sich ein Stempel A bewegt, dem der erste Wagen des Zugs, der Conducteurwagen, vermittelst eines starken Verbindungsstücks B angehängt ist. Die Bewegung des Stempels ist die Wirkung der atmosphärischen Luft, welche von hinten her auf ihn drückt, während vor demselben die Luft durch riesenhafte Maschinen ausgepumpt wird. Oben hat die cylindrische Röhre ihrer ganzen Länge nach einen Spalt, durch den das Verbindungsstück B hindurchgeht (die nebenstehende Figur zeigt dies im Querschnitt) und der vor und hinter diesem durch eine Klappe luftdicht verschlossen ist. Diese Klappe besteht aus einem einseitig befestigten ledernen Band, das oben und unten durch Stücke von Eisenblech verstärkt ist. Die Kolbenstange D, an welcher der Verbindungsarm B befestigt ist, trägt vier Rollen, zwei vor und zwei hinter diesem Arm. Diese Rollen, von denen die erste und vierte kleiner sind als die zweite und dritte, dienen dazu, die Klappe nach und nach zu öffnen, um dem Verbindungsarm freien Durchgang zu verschaffen, und sie hinter diesem wieder allmälig in den Spalt zurücksinken zu lassen. Die Rolle E drückt die Klappe von oben in den Spalt hinein, und hinter dieser Rolle folgt noch ein kurzes,



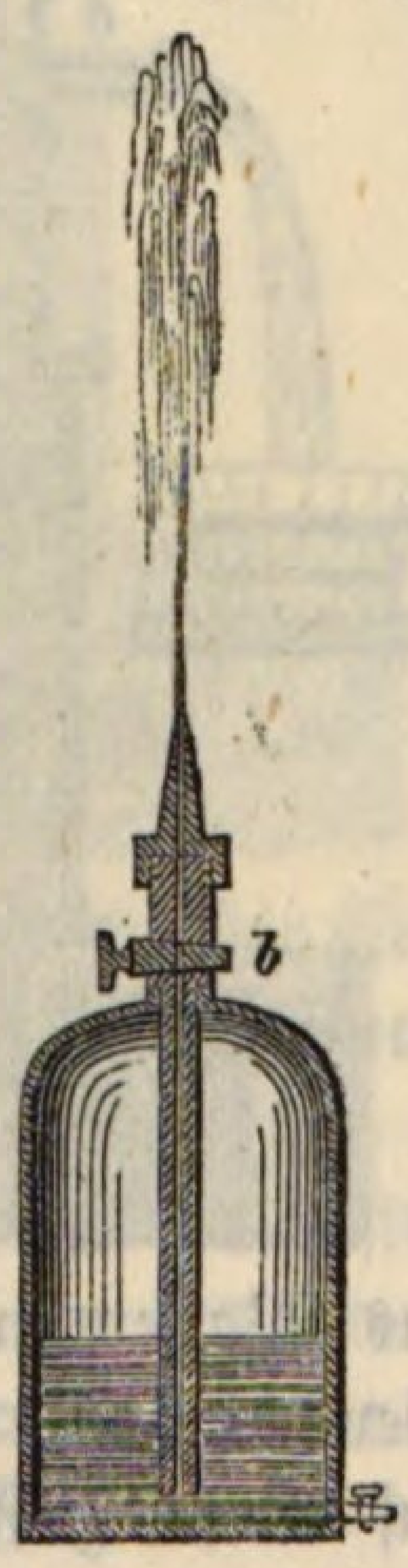
durch glühende Kohlen erwärmtes Röhrenstück F, das den Zweck hat, die unmittelbar vor der Klappenöffnung in einer Art Rinne befindliche, aus Wachs und Talg bestehende, Masse zu erweichen und damit die Oeffnung der Klappe luftdicht zu verkleben.

Die atmosphärische Eisenbahn hat den Hauptvortheil, daß sie viel größere Steigungen zuläßt, als die mit Lokomotiven befahrenen; außerdem ist keine Gefahr vorhanden, daß der Zug aus den Schienen gleite, oder daß zwei Züge zusammenstoßen und endlich können keine Unglücksfälle vorkommen, die ihre Ursache in der Feuerung und in der Gewalt des Dampfes haben. Dennoch hat das atmosphärische Eisenbahnsystem bis jetzt keine größere Verbreitung gefunden, was in dem größern Kostenaufwand, den diese Bahnen erfordern sollen, seinen Grund haben mag.

2. Die Compressionspumpe.


a

Die **Compressionspumpe,** welche gebraucht wird, um die Luft zu verdichten, besteht in ihrer einfachsten Form aus einem Stiefel, in welchem sich ein massiver Kolben luftdicht hin und her bewegt, und an welchem unten ein nach außen sich öffnendes Ventil angebracht ist, wie dieß die nebenstehende Figur zeigt. Wird unten ein Gefäß angeschraubt, so wird bei jedem Niedergang des Kolbens die unter demselben befindliche Luft des Pumpencylinders durch das Ventil in das Gefäß hineingepreßt; beim Rückgang des Kolbens schließt sich das Ventil durch den stärkern Druck von unten, und der Stiefel bleibt luftleer, bis der Kolben sich über eine seitwärts angebrachte Oeffnung a erhoben hat, durch welche eine neue Menge Luft in den Cylinder tritt, die durch den nächsten Niedergang des Kolbens in das Gefäß getrieben wird u. s. f.

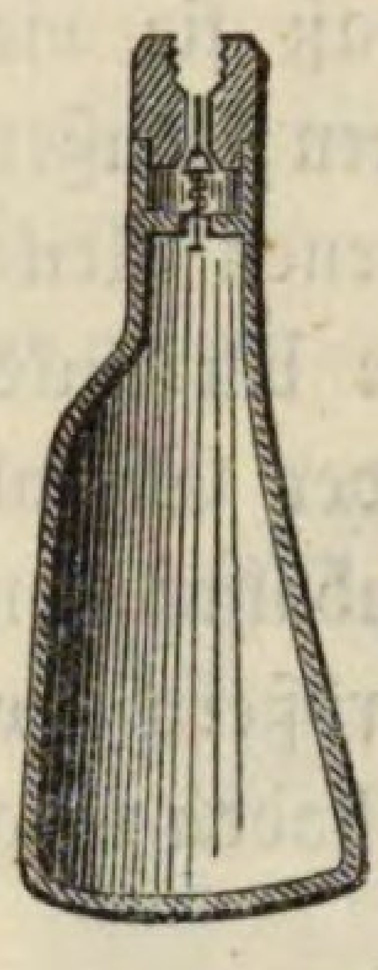

b

a

Der **Heronsball** ist eine sehr starke metallene Flasche, die durch eine Oeffnung a zum Theil mit Wasser gefüllt wird; der Hals verlängert sich im Innern in eine Röhre, die bis ziemlich nahe an den Boden des Gefässes geht. Wird mittelst einer Compressionspumpe Luft in die Flasche gepumpt, so lagert sich über dem Wasser verdichtete Luft und drückt auf die Oberfläche desselben. Nun wird die Halsöffnung durch einen Hahnen b abgeschlossen und statt der Pumpe ein Ansatz mit enger Mündung aufgeschraubt, aus dem beim Oeffnen des Hahnens ein Strahl Wasser austritt, da der Druck der im Ballon befindlichen Luft den äußern Luftdruck überwiegt. — Die

Spritzflasche der Chemiker hat eine ähnliche Einrichtung; nur wird die Luft hier nicht mit einer Pumpe hineingepreßt, sondern eingeblasen.

Die Einrichtung der **Windbüchse** beruht auf der Spannkraft der stark zusammengepreßten Luft. Der hohle Kolben der Büchse bildet ein

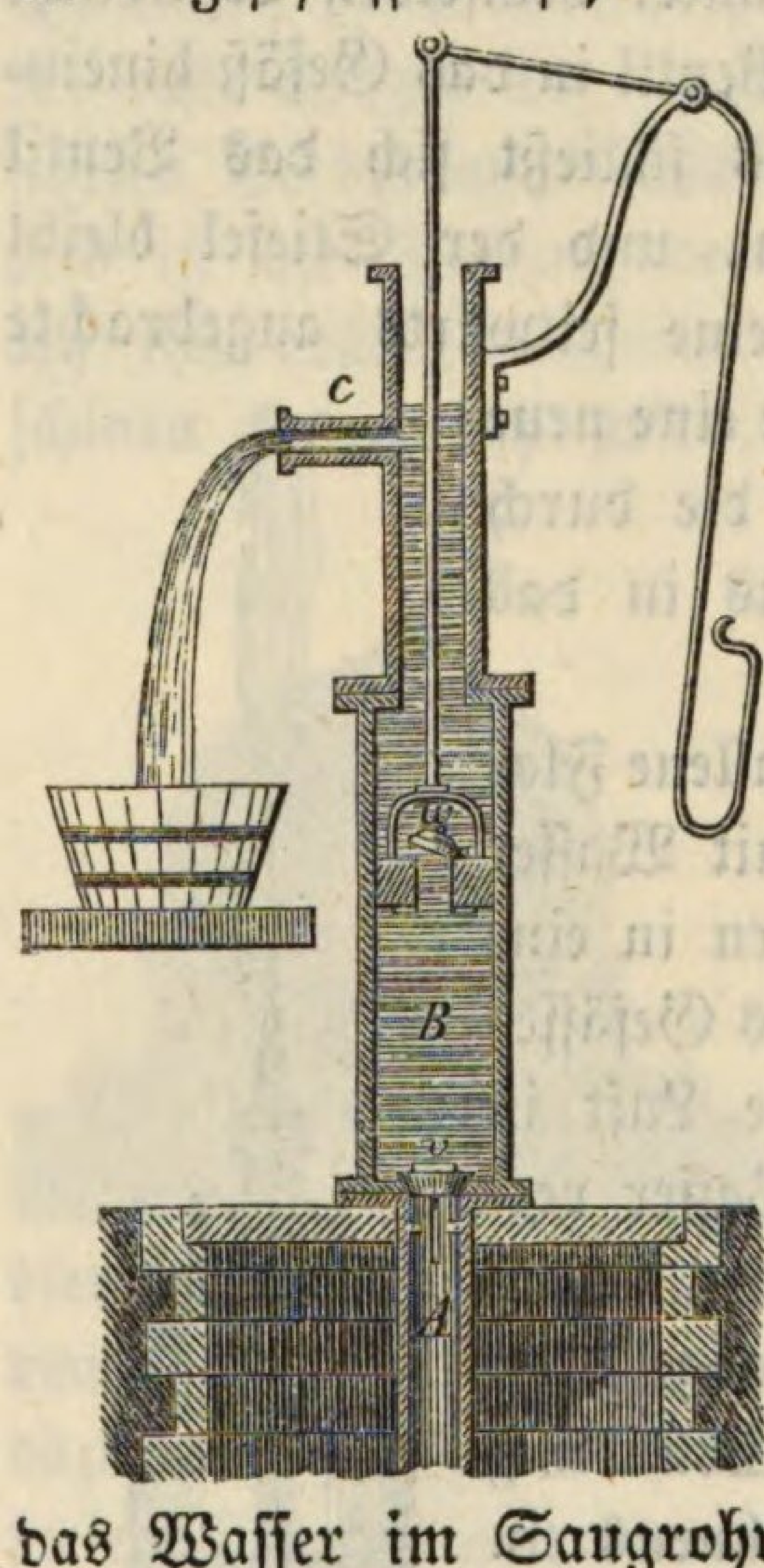


Gefäß mit sehr starken Wänden, in das die Luft mittelst einer Pumpe hinein gepreßt wird. Ist die Verdichtung auf einen hohen Grad getrieben, so ist die Büchse geladen, und der Lauf wird angeschraubt, der die Kugel aufnimmt. Das Ventil des Kolbens steht mit dem Schloß in Verbindung und wird beim Schnappen des Hahnens einen Augenblick geöffnet, so daß ein kleiner Theil der verdichteten Luft mit sehr großer Geschwindigkeit austritt und die Kugel fortschleudert. Mit derselben Ladung kann man mehrere Schüsse nach einander thun.

Vorrichtungen,

welche auf dem Gleichgewicht des aerostatischen und des hydrostatischen Druckes beruhen.

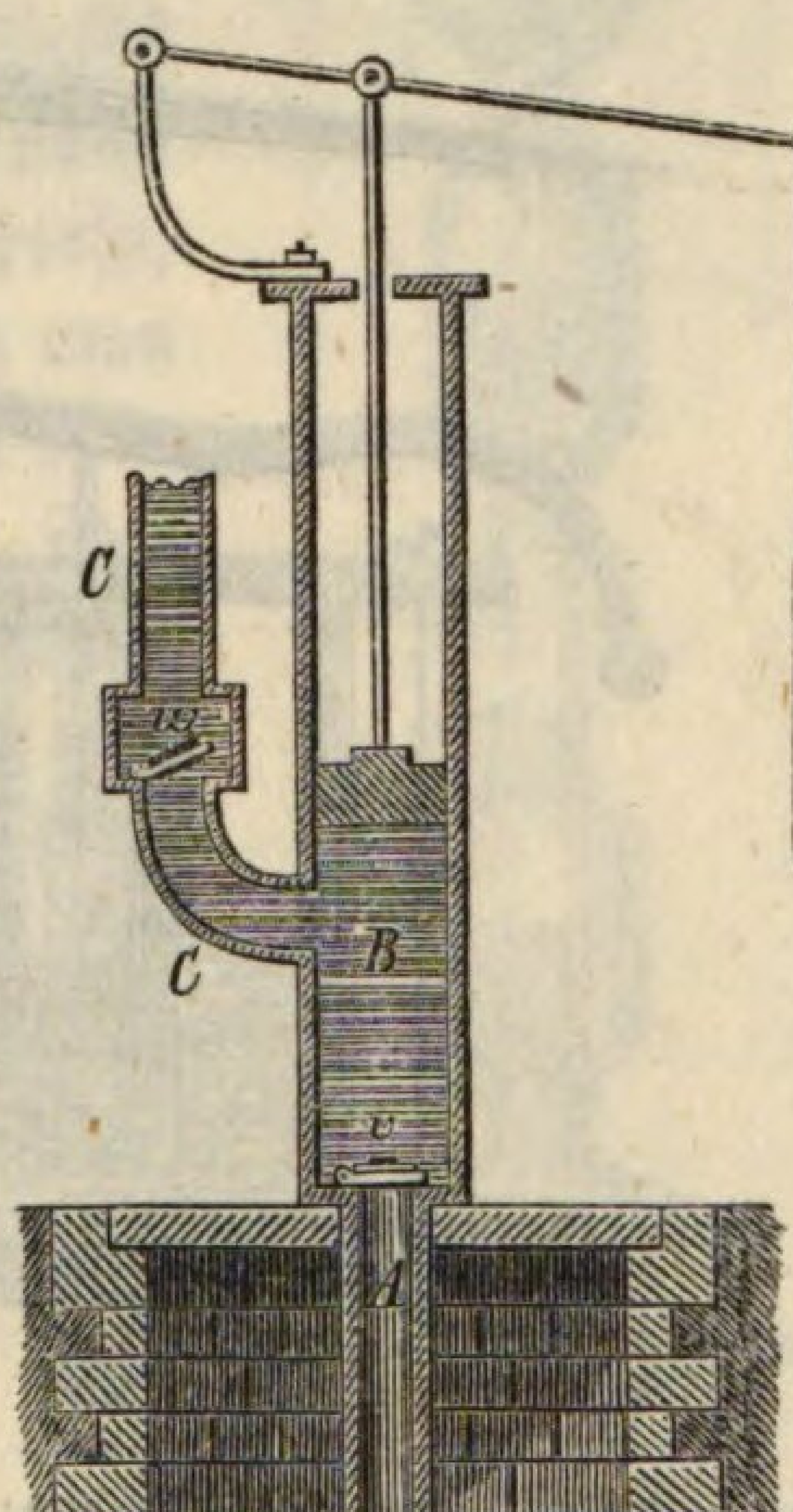
Die **Saugpumpe** besteht aus dem Saugrohr A, das bis in das Wasser des Behälters reicht und durch ein nach oben sich öffnendes Ventil v geschlossen ist, und aus dem Pumpenrohr B, in welchem sich



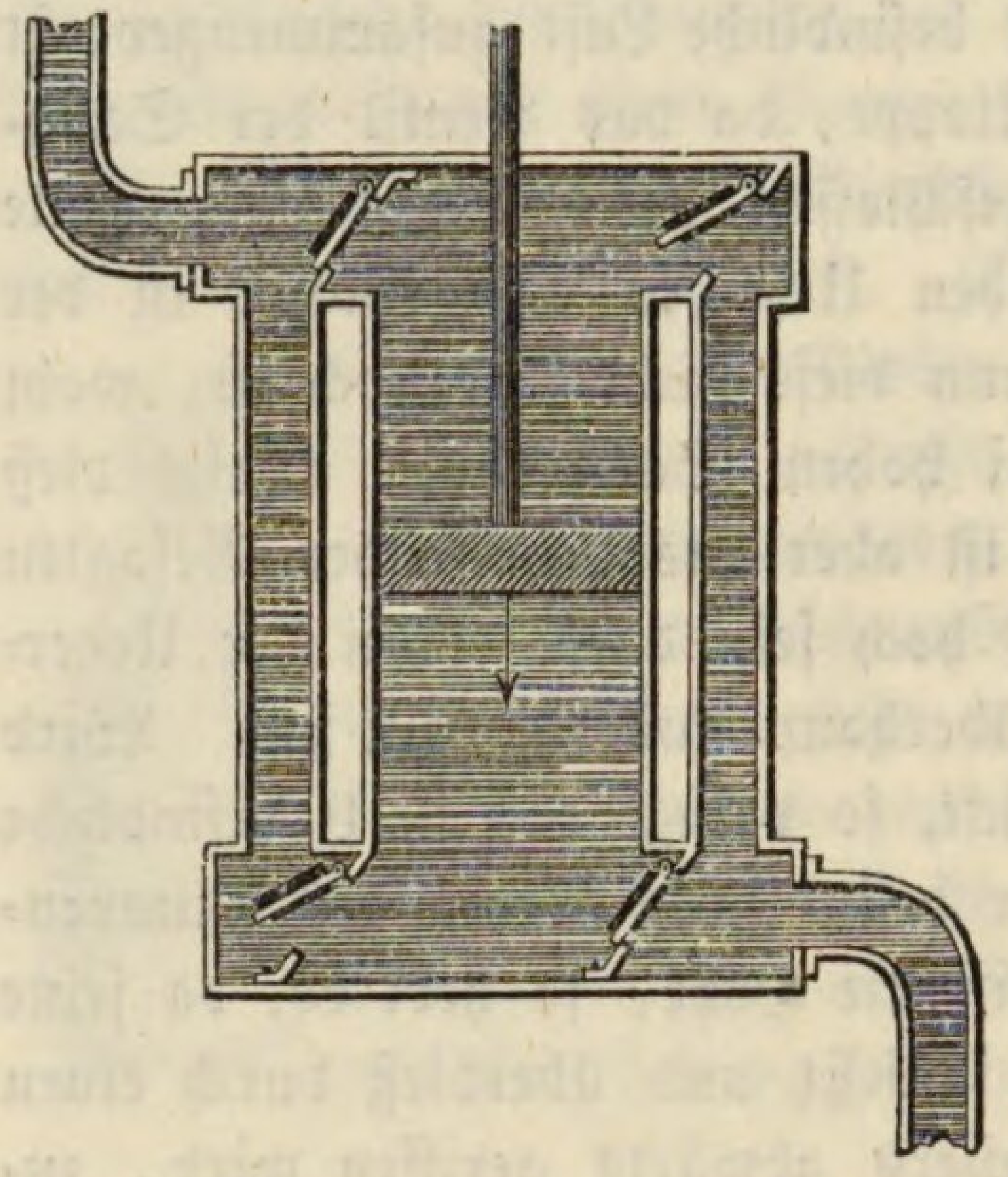
der Kolben oder Stempel bewegt, dessen Durchbohrung ebenfalls durch eine Klappe w, die sich nach oben öffnet, geschlossen ist; oben am Pumpenrohr ist das Ausflußrohr C angebracht. Es sei die ganze Pumpe Anfangs mit Luft gefüllt, und der Stempel befinde sich am Boden des Pumpenrohrs. Wenn nun der Stempel in die Höhe gezogen wird, so läßt er einen mit verdünnter Luft erfüllten Raum hinter sich; seine Klappe bleibt geschlossen, weil der Druck der Atmosphäre von oben stärker ist als der von unten wirkende Druck der verdünnten Luft; dagegen öffnet die im Saugrohr befindliche Luft von gewöhnlicher Dichtigkeit das untere Ventil, und dringt zum Theil in den Raum B. Die Folge davon ist, daß durch den Druck der äußern Luft das Wasser im Saugrohr steigt, bis die so gehobene Säule durch ihr Gewicht das ersetzt, was die darüber befindliche Luft durch Vertheilung auf einen größern Raum an Spannkraft verloren hat. Geht nun der

Stempel nieder, so wird die darunter befindliche Luft zusammengepreßt und entweicht endlich durch die obere Klappe, da das Ventil der Saugröhre sich durch sein eigenes Gewicht geschlossen hat. Durch eine zweite Hebung des Kolbens steigt aus denselben Ursachen das Wasser in der Saugröhre höher hinauf, und tritt, wenn diese nicht sehr hoch ist, wohl schon dießmal in das Pumpenrohr; bei hohen Saugröhren erfolgt dieß erst nach mehreren Kolbenhüben. Es ist aber aus dem früher Gesagten klar, daß die Saugröhre nicht ganz 32′ hoch sein darf, wenn der Uebertritt des Wassers in das Pumpenrohr überhaupt möglich sein soll. Wird nun der Stempel abermals niedergedrückt, so dringt das in B befindliche Wasser durch die Klappe in den darüber befindlichen Raum des Pumpenrohrs; geht dann der Stempel wieder in die Höhe, so hebt er, da seine Klappe durch ihr eigenes Gewicht sich schließt und überdieß durch einen kleinen zurückströmenden Theil des Wassers abwärts gerissen wird, zugleich auch das über ihm befindliche Wasser, das durch die Röhre C ausfließt, so bald es dieselbe erreicht.

Die **Druckpumpe** hat einen massiven Kolben; unterhalb desselben mündet das Steigrohr C in die Pumpe. Sowohl das Steigrohr als der Pumpencylinder B (oder das Saugrohr A) sind mit nach oben sich öffnenden Klappen (w und v) versehen. Wenn der Stempel in die Höhe geht, so schließt sich die Klappe w des Steigrohrs, während durch die des Pumpenrohrs (v) Anfangs Luft und später Wasser in dieses eindringt. Beim Niedergang des Stempels schließt sich das Bodenventil v und der Inhalt des Pumpenrohrs — Anfangs Luft, hernach Wasser — wird durch die sich öffnende Klappe w in den obern Theil des Steigrohrs getrieben. Die Druckpumpe wird gewöhnlich da angewendet, wo das Wasser auf eine bedeutende Höhe gehoben werden soll; auch kann sie gebraucht werden, um Wasser in Behälter hineinzupressen, bei denen sich dem Eintritt desselben ein großer Widerstand entgegenstellt, wie z. B. im Dampfkessel; die Eingußröhre eines solchen Behälters muß mit einem nach innen sich öffnenden Ventil versehen sein.

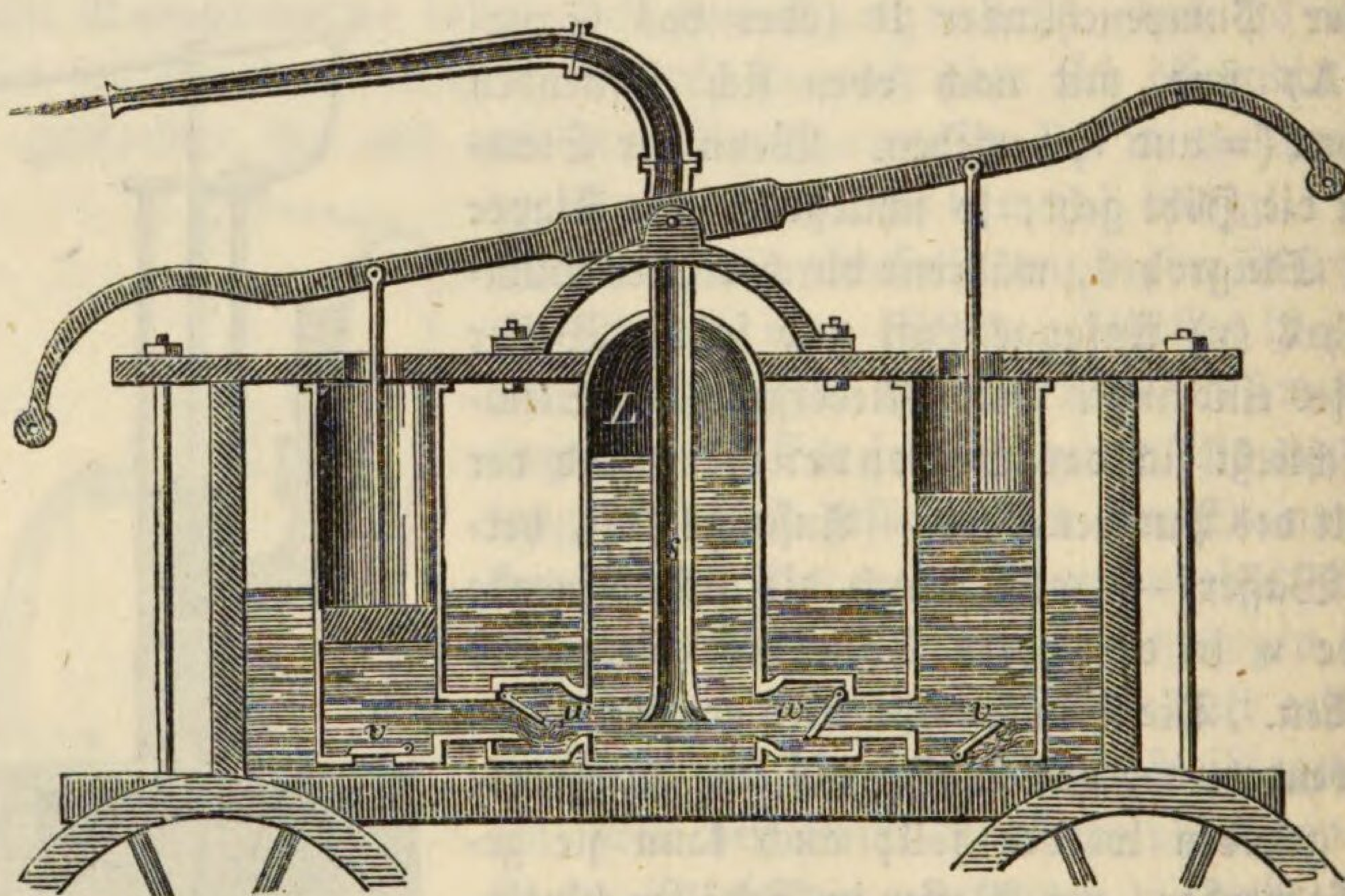


Bei dieser Art von Saug- und Druckpumpen erfolgt der Ausfluß des Wassers absetzungsweise, da er beim jedesmaligen Steigen des Stempels unterbrochen wird. Um einen ununterbrochenen oder konstanten Ausfluß zu erhalten, wendet man **doppelt-wirkende Pumpen** an,



die aus zwei Pumpenröhren mit einem oder zwei Stempeln bestehen. Die hier beigegebene Zeichnung stellt eine doppelt wirkende Druckpumpe mit **einem** Stempel dar. Die Klappen sind so gezeichnet, wie sie sich beim Abwärtsgehen des Stempels stellen; das übrige Spiel der Maschine ist durch die Zeichnung von selbst verständlich.

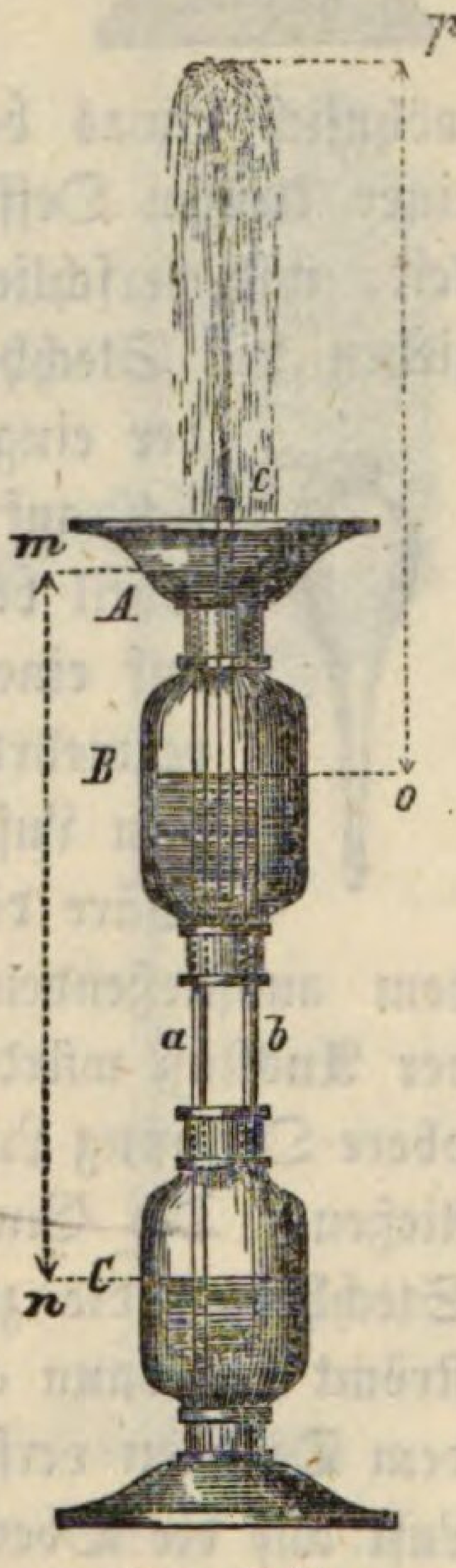
Die **Feuerspritze** ist eine doppelt wirkende Druckpumpe. Das Wasser tritt durch die Bodenventile v in den Pumpenkörper, und wird durch die Steigrohrventile w in den **Windkessel** gepreßt, aus dem es in die eigentliche Steigröhre s eintritt, deren untere Mündung sich ziemlich nahe am Boden des Windkessels befindet, und die oben mit einem sogenannten **Schwanenhals**, einer gegliederten, nach allen Richtungen drehbaren Röhre mit enger Mündung, endigt.



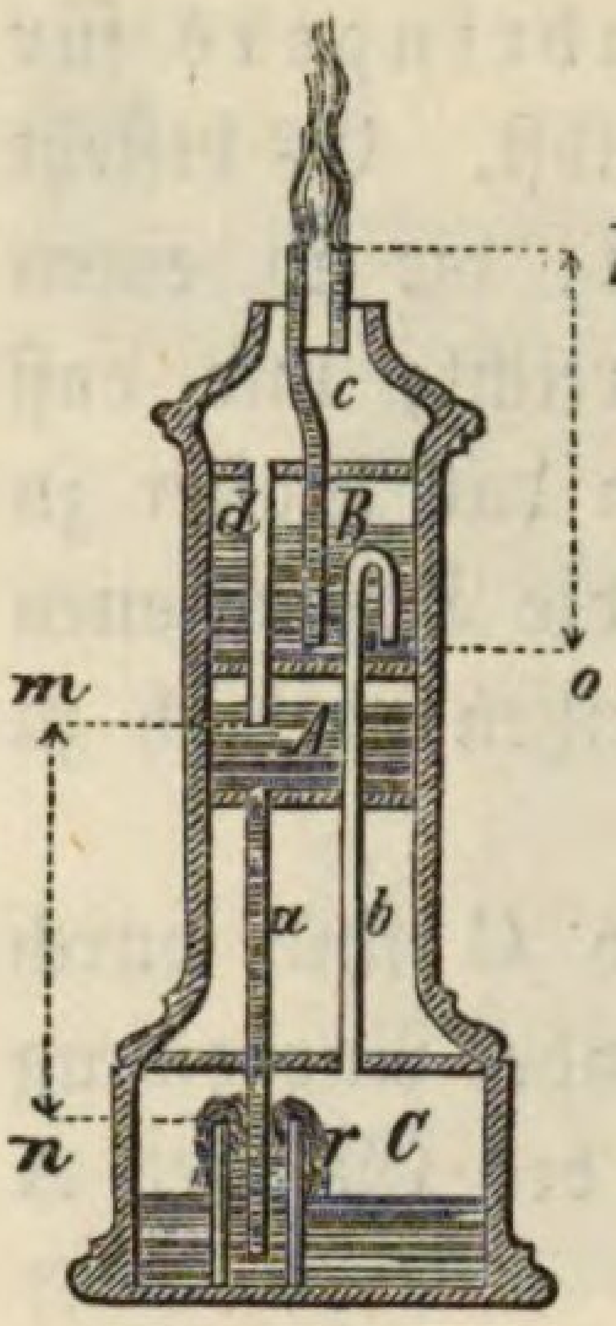
Der obere Theil des Windkessels ist mit Luft gefüllt, die durch das eindringende Wasser auf einen kleinern Raum zusammengepreßt wird; dieses elastische Luftkissen drückt daher mit einer entsprechenden Spannkraft beständig auf die Oberfläche des Wassers, so daß der Strahl in gleicher Stärke ununterbrochen austritt. Die äußere Oeffnung des Steigrohrs wird mit dem Finger so lange zugehalten, bis die Luft im Windkessel so stark zusammengedrückt ist, daß sie dem Wasserstrahl eine hinreichende Geschwindigkeit zu geben vermag.

Die Einrichtung des **Hydrophors** oder Wasserzubringers für Feuerspritzen ist ganz ähnlich, wie die der Feuerspritzen selbst. Es besteht nur der Unterschied, daß eine Saugröhre angebracht ist, die in einen großen Wasserbehälter, einen Teich, See oder Fluß, reicht, und daß die Steigröhre durch einen Schlauch ersetzt ist, durch den das Wasser zu der Feuerspritze auf der Brandstätte gelangt. Auch sind die Dimensionen größer, da der Hydrophor gewöhnlich drei bis vier Spritzen zugleich zu speisen hat.

Der **Heronsbrunnen.** Drei Gefässe A, B und C sind durch drei an beiden Enden offene Röhren a, b und c in folgender Anordnung mit einander verbunden: die Röhre a geht vom Boden des Gefässes A durch B hindurch bis ziemlich nahe an den Boden von C; b geht vom Deckel des Gefässes C bis unter den Deckel von B; c endlich reicht nicht ganz an den Boden von B und mündet über dem Wasserspiegel des Gefässes A. Ueberall findet luft- und wasserdichter Verschluß statt. Wenn aus A Wasser in C fließt, so wird die in diesem Gefäß befindliche Luft zusammengedrückt und entweicht durch b in das Gefäß B. Hier drückt die verdichtete Luft auf die Oberfläche des Wassers und dieses wird in die Röhre c gepreßt, aus welcher es in einem Strahl ausfließt, wenn man die obere Oeffnung derselben so lange verschlossen hält, bis die Luft die erforderliche Dichte erreicht hat. Der Wasserstrahl fällt in das Gefäß A zurück und speist die Röhre a, bis sich endlich auf diese Weise das Gefäß B in das Gefäß C entleert hat. Die Höhe, welche der Wasserstrahl höchstens erreicht, läßt sich leicht ermitteln: die drückende Wassersäule ist offenbar mn; die Luft in B und C hat also eine diesem Wasserdruck entsprechende höhere Spannkraft, als die Atmosphäre, und ist daher im Stande, das Wasser in B um eine Höhe op gleich mn über sein Niveau zu erheben.



Girard hat auf den Heronsbrunnen die Einrichtung einer nach ihm benannten Lampe gegründet, die ihren Haupttheilen nach auf der nächsten Seite abgebildet ist. Da die Hauptbedingung einer guten Lampe darin besteht, daß das Oel während des Brennens immer gleich hoch stehe und die Flamme hinreichend speise, so taugt die gewöhnliche Einrichtung des Heronsbrunnens schlecht dazu, weil die Höhe mn in der vorhergehenden Figur abnimmt, je höher das Niveau in C steigt und zugleich in B fällt. Um eine konstante Höhe zu erhalten, hat Girard ein kleines Rohr r ange-

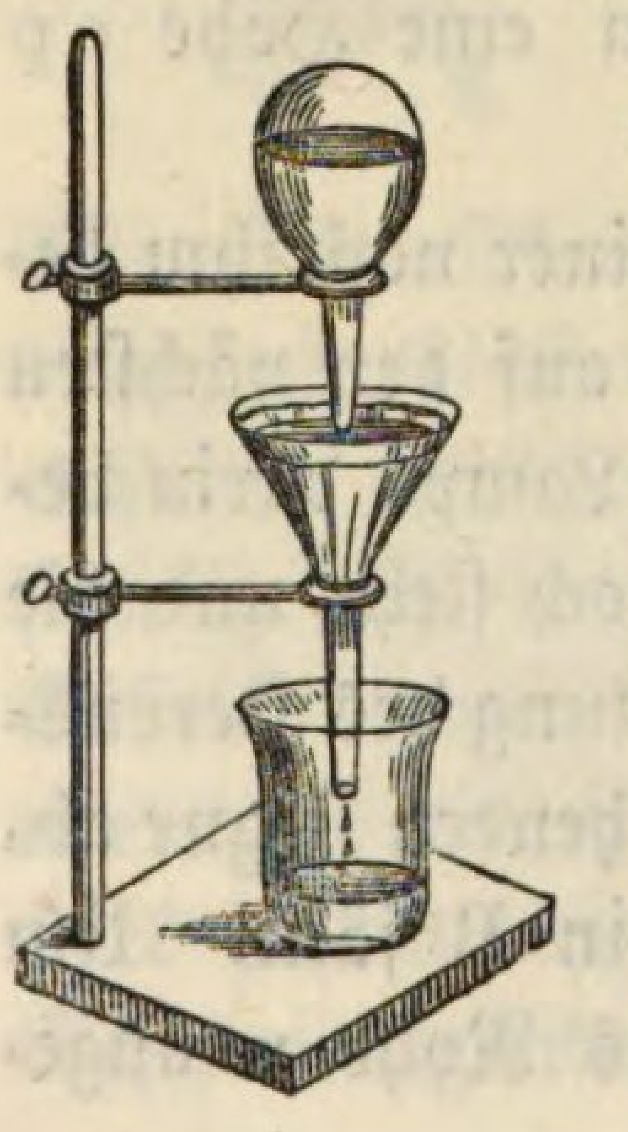


bracht, in welches das Oel zunächst fließt; die drückende Flüssigkeitssäule hat also die Höhe mn, so lange das Niveau der Flüssigkeit in C nicht über den Rand von r steigt. Dadurch, daß die Röhre b unter der Oberfläche der Flüssigkeit in B, ziemlich nahe am Boden mündet, ist auch die Höhe des Punkts o von dem Niveau des Oels in diesem Gefäß unabhängig gemacht. Es braucht kaum darauf aufmerksam gemacht zu werden, daß hier das Gefäß A nicht über, sondern unter dem Gefäß B steht, und daß die Luft durch eine vierte Röhre d in dasselbe eintritt.

Der **Stechheber** besteht aus einer weiten, gewöhnlich etwas bauchigen Röhre, die nach unten enger wird und mit einer kleinen Oeffnung endigt. Taucht man denselben in eine Flüssigkeit, und verschließt hierauf die obere Oeffnung, so läuft beim Herausziehen des Stechhebers aus der Flüssigkeit nur ein ganz geringer Theil



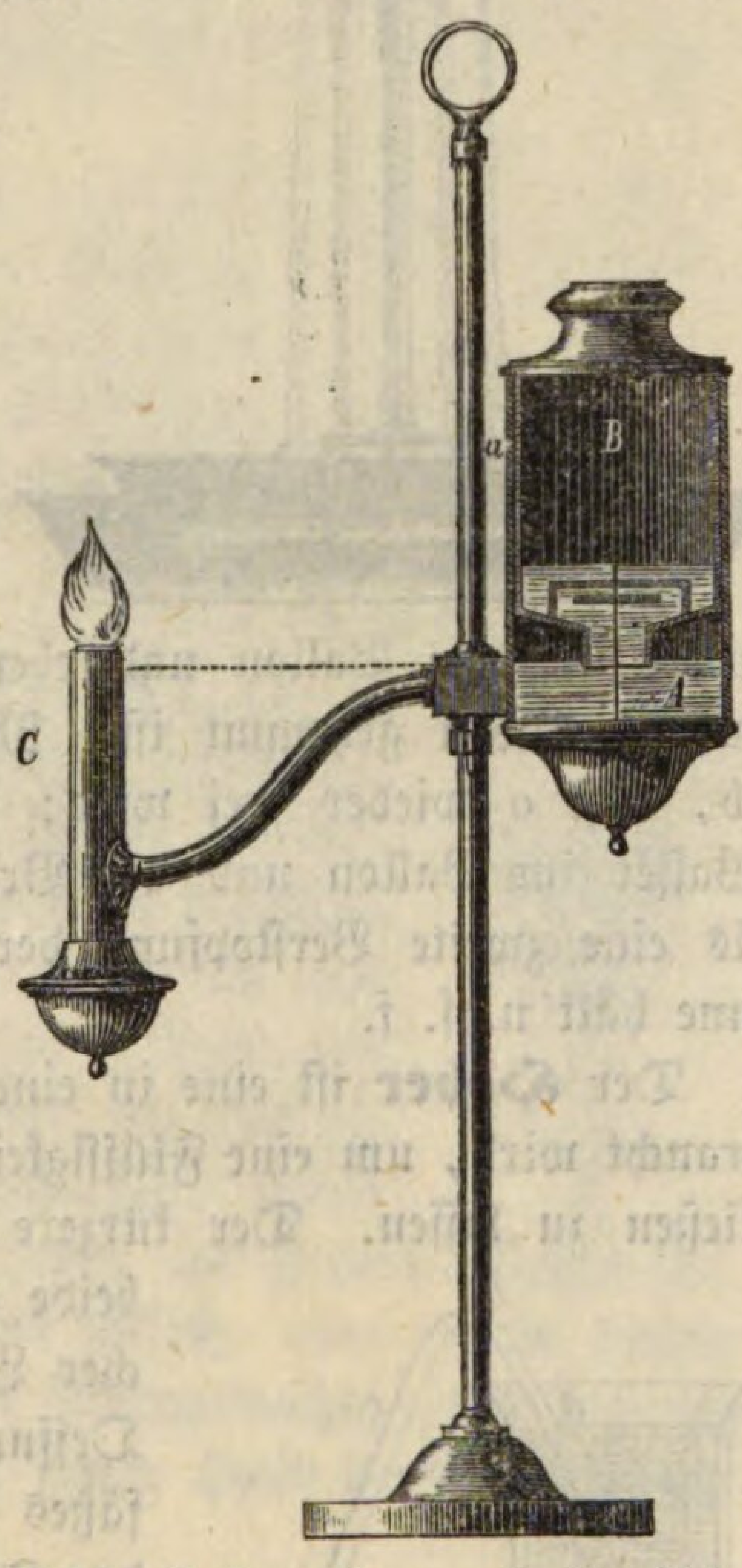
der eingedrungenen Flüssigkeit aus. Der Ausfluß hört nämlich auf, sobald die Spannkraft der im obern, verschlossenen Theil des Stechhebers befindlichen Luft durch ihre Ausdehnung auf einen größeren Raum so weit abgenommen hat, daß sie, vermehrt um den Druck der kleinen Flüssigkeitssäule im Heber, dem Luftdruck eben noch das Gleichgewicht zu halten vermag. Wäre die untere Oeffnung nicht klein genug, so könnte neben dem ausfließenden Wasser gleichzeitig Luft durch dieselbe eindringen und der Ausfluß würde daher keine Unterbrechung erleiden. Wird durch die obere Oeffnung Luft zugelassen, so fängt die Flüssigkeit wieder an auszufließen. Die Einrichtung des Zaubertrichters gründet sich auf den Stechheber: die zwischen seinen doppelten Wänden enthaltene Flüssigkeit strömt erst dann aus, wenn eine an der Handhabe angebrachte und mit dem Daumen verschließbare Oeffnung freigelassen wird, so daß die äußere Luft auf die Oberfläche der Flüssigkeit drücken kann.



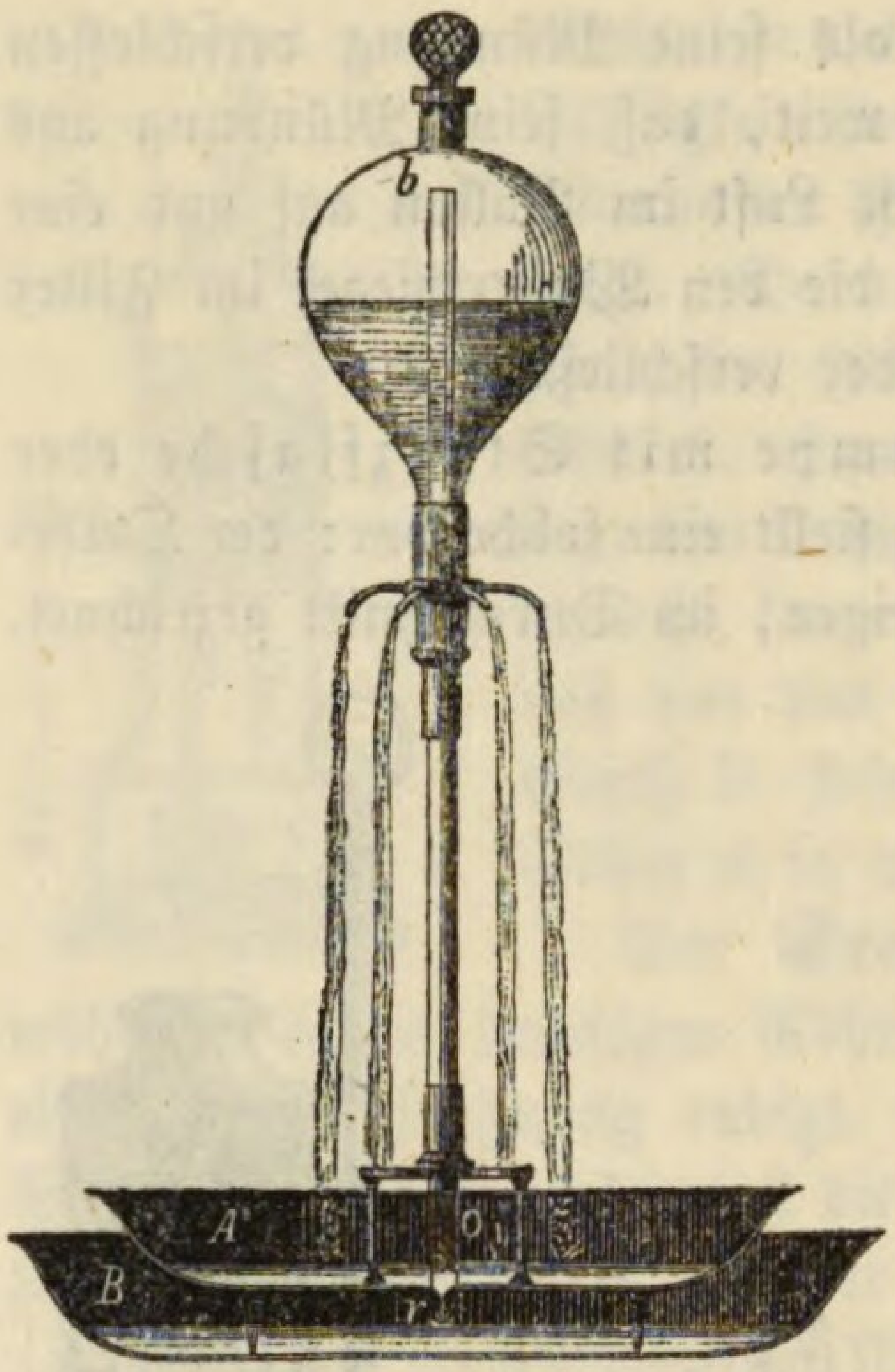
Die Chemiker bedienen sich des Filters, um chemische Niederschläge von den Flüssigkeiten, in welchen sie gebildet wurden, zu trennen, oder auch, um chemische Stoffe auszuwaschen. Der Filtrirapparat besteht aus einem Trichter, der innen mit einer Dute von Fließpapier ausgeschlagen ist, durch welches die Flüssigkeit langsam abfließt. Um der Mühe überhoben zu sein, zeitweise Wasser nachzugießen, und doch das Niveau im Filter gleich hoch zu erhalten, kann man die hier abgebildete Einrichtung treffen. Aus dem Glasballon fließt

so lange kein Wasser in den Trichter, als seine Mündung verschlossen ist; sinkt aber das Wasser im Filter so weit, daß seine Mündung aus demselben heraustritt, so steigt eine Blase Luft im Ballon auf und eine entsprechende Menge Wasser fließt aus, die den Wasserspiegel im Filter hebt, und die Mündung des Rohrs wieder verschließt.

Eine ähnliche Einrichtung hat die Lampe mit Sturzflasche oder die Stangenlampe. Unsere Zeichnung stellt eine solche vor: der Oelbehälter ist, um die innere Einrichtung zu zeigen, im Durchschnitt gezeichnet. Das Hauptgefäß A, aus welchem das Oel in den Dochtcylinder fließt, ist mit einem Deckel versehen, welcher ein Gefäß B trägt, das unten offen ist, und dessen unterer Rand genau in die Höhe zu stehen kommt, bis zu welcher das Oel im Rohr C reichen soll, das mit A kommunizirende Röhren bildet. Wenn das Gefäß B mit Oel gefüllt ist und umgestürzt wird, so kann sein Inhalt nicht ausfließen, weil die Mündung durch eine Scheibe verschlossen ist, die sich erst öffnet, wenn der durch dasselbe gesteckte Draht auf dem Boden des Behälters A aufsteht. Reicht das Niveau in A nicht bis zum Rand des Gefässes B, so fließt aus diesem so lange Oel aus, bis seine Mündung untergetaucht ist. Nun hört der Zufluß auf, bis die Flamme so viel Oel verzehrt hat, daß der untere Rand von B wieder frei wird, und eine neue Portion Oel von B in A sich ergießt, während gleichzeitig eine Blase atmosphärischer Luft, die durch die kleine Oeffnung a eintreten kann, in B aufsteigt. Auf diese Weise wird also erreicht, daß das Oel den Docht immer bis zu der gleichen Höhe umgibt, und so die Flamme gleichmäßig gespeist wird.

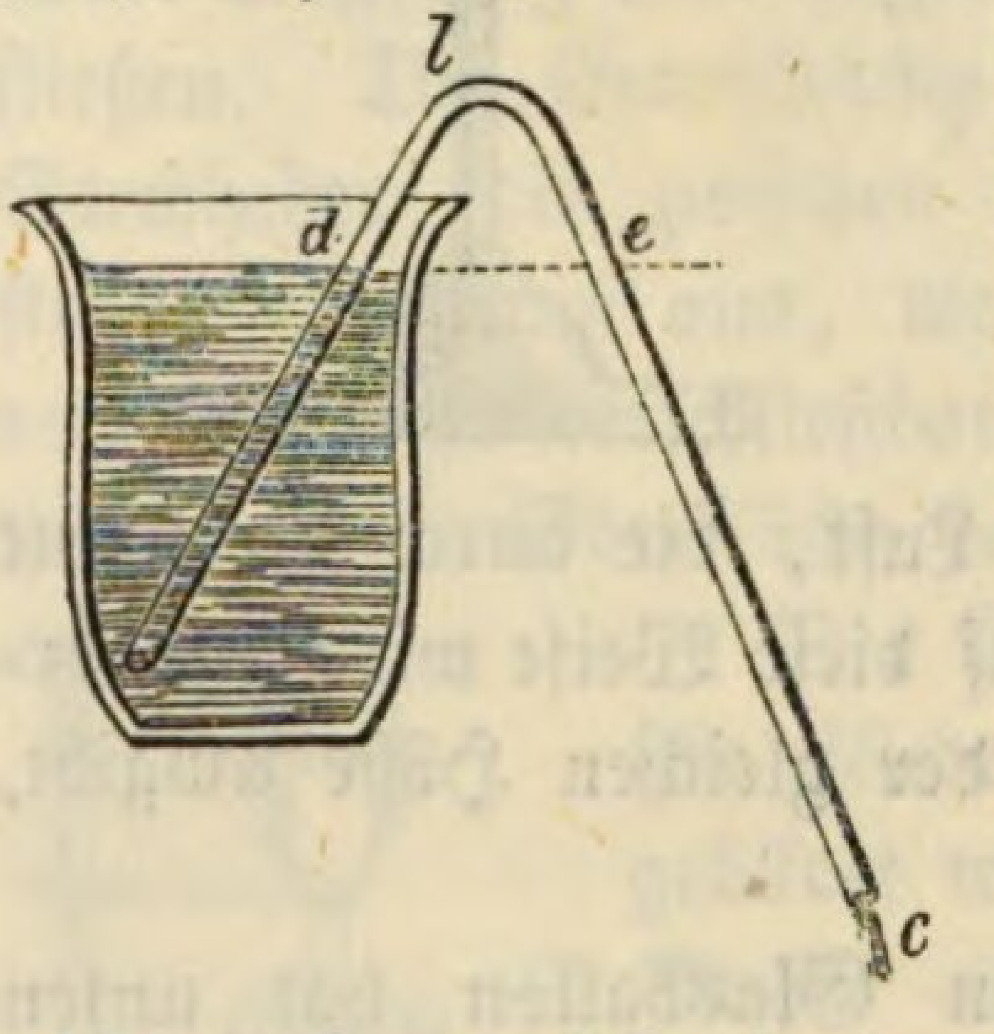


Der intermittirende Brunnen. Ein Glasballon hat unten einen Ansatz, an dem mehrere enge Ausflußröhren angebracht sind; der Ansatz kann so gedreht werden, daß die Ausflußröhren bald mit dem Innern des Ballons in Verbindung stehen, bald von demselben abgeschlossen sind. Eine unten geschlossene Röhre ab ist in einem schalenförmigen Gefäß A festgemacht, und reicht fast bis an die obere Wölbung des Ballons; unten ist sie mit einer kleinen Seitenöffnung o versehen, durch



welche die Luft in den Ballon gelangen kann. Füllt man daher den Ballon mit Wasser, indem man ihn von der Röhre ab losschraubt und die Ausflußröhren verschließt, so fängt das Wasser zu fließen an, sobald man den Ballon wieder aufgesetzt und die Ausflußröhren durch Drehung des Ansatzes geöffnet hat. Das ausströmende Wasser sammelt sich zunächst in der Schale A, und fließt von hier durch ein Röhrchen r in ein größeres Becken B. Die Weite der Röhre r ist so gewählt, daß das Wasser nicht eben so schnell abfließt, als es aus dem obern Behälter herunter strömt; daher hebt sich der Wasserspiegel in A und verschließt endlich die Oeffnung o, so daß der Luftzutritt in den Ballon und eben damit auch der Ausfluß des Wassers aus demselben gehemmt ist. Mittlerweile fließt durch r so viel Wasser ab, daß o wieder frei wird; die äußere Luft drückt wieder auf das Wasser im Ballon und der Brunnen fängt auf's Neue an zu fließen, bis eine zweite Verstopfung der Oeffnung o macht, daß er abermals inne hält u. s. f.

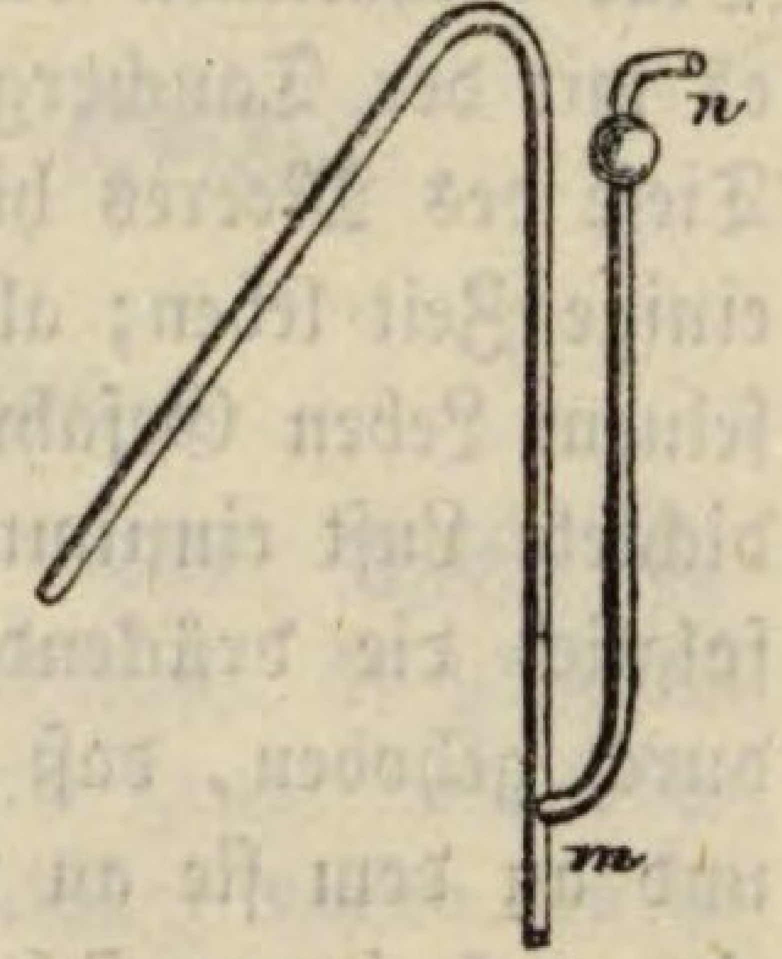
Der **Heber** ist eine in einem Winkel gebogene Röhre, die dazu gebraucht wird, um eine Flüssigkeit von einem Gefäß in ein anderes überfließen zu lassen. Der kürzere Schenkel der Röhre — gewöhnlich sind



beide Schenkel ungleich lang — wird in solcher Lage in die Flüssigkeit getaucht, daß die Oeffnung c des längern außerhalb des Gefäßes befindlichen Theils unter das Niveau d e der Flüssigkeit zu stehen kommt. Saugt man alsdann bei c den Heber an, so tritt die Flüssigkeit in den längern Schenkel über, und sobald sie diesen bis unter den Punkt e anfüllt, steigt sie, wenn auch nicht weiter gesaugt wird, nicht mehr zurück, sondern fließt aus der Oeffnung c aus, so lange diese tiefer steht als das Niveau der Flüssigkeit im Gefäß.

Ist nämlich der Heber bis e gefüllt, so streben die Flüssigkeitssäulen b d und b e nach entgegengesetzten Richtungen hinabzufallen, was nicht zugleich geschehen kann, da sonst bei b ein luftleerer Raum entstehen

müßte. Beide Säulen haben gleiche Höhe und stehen unter dem gleichen Luftdruck; es besteht also Gleichgewicht zwischen ihnen. In dem Augenblick aber, wo die Säule in einem von beiden Schenkeln das Uebergewicht erhält, was z. B. im äußern Schenkel eintritt, sobald er bis unter den Punkt e gefüllt ist, fällt dieselbe herab und fließt aus, während aus dem Gefäß immer neue Flüssigkeit nachströmt. Kommt c höher zu stehen, als das Niveau der Flüssigkeit, so gewinnt die Flüssigkeitssäule des andern Schenkels das Uebergewicht und die Flüssigkeit steigt in's Gefäß zurück: der Heber hört auf zu fließen.



Theils um das Ansaugen des Hebers bequemer zu machen, theils um zu vermeiden, von der Flüssigkeit etwas in den Mund zu bekommen, bringt man gern ein besonderes Saugrohr mn an demselben an; während man bei n ansaugt, muß die Oeffnung m verschlossen sein.

Der **Vexirbecher**, auch Zauberbecher oder Becher des Tantalus genannt, ist eine Spielerei, die auf der Anwendung des Hebers beruht. In dem Becher ist ein verborgener Heber angebracht, dessen kürzerer Schenkel nahe am innern Boden mündet, so daß die in den Becher gegossene Flüssigkeit in denselben eintreten kann; der längere Schenkel geht durch den Fuß des Gefässes und mündet am Grunde desselben. Füllt man nun den Becher, so fängt, wie leicht erklärlich, die Flüssigkeit an, aus dem längern Schenkel auszufließen, sobald das Niveau der Flüssigkeit den höchsten Punkt des Hebers erreicht hat. Läßt man die Flüssigkeit in ein verborgenes Gefäß, etwa in den hohlen Fuß des Bechers, fließen, so erstaunt der Uneingeweihte, nach wenigen Augenblicken den vorher gefüllten und von keiner Hand berührten Becher geleert zu sehen.



Die **Taucherglocke**, deren Beschreibung wir hier noch beifügen, wird dazu gebraucht, auf den Grund des Meeres hinabzusteigen, um allerlei Gegenstände, untergegangene Schiffe, versunkene Waarenballen, auch Muscheln, Korallen u. s. w. aufzusuchen und an das Tageslicht zu befördern. Die Taucherglocke ist ein in einem Stück gegossener eiserner, ungefähr 6 Fuß hoher Kasten von der Form einer abgestumpften Pyramide oder eines abgestumpften Kegels, der oben mit mehreren dicken Glasscheiben versehen ist, durch welche das Licht eindringen kann: im Innern sind ringsum Bänke zum Sitzen und zum Aufbewahren von Werkzeugen und kleineren aufgefundenen Gegenständen ꝛc. angebracht.

Wenn wir ein mit Luft gefülltes Glas umgekehrt auf die Oberfläche

des Wassers setzen, und untertauchen lassen, so bemerken wir, daß die Luft in demselben zwar zusammengedrückt wird, daß aber der Wasserspiegel im Glas gegen das äußere Niveau zurücksteht. Lassen wir ein Korkstück, das eine kleine, angezündete Kerze trägt, auf dem Wasser schwimmen, und stürzen wir ein umgekehrtes Glas sorgfältig darüber, so brennt das Licht noch einige Zeit fort, bis der Sauerstoff der im Glas enthaltenen Luft verzehrt ist. Eine ganz gleiche Bewandtniß hat es mit der Taucherglocke: ein Mensch, der in einer Taucherglocke in die Tiefe des Meeres hinabfährt, kann in der darin enthaltenen Luft wohl einige Zeit leben; allmälig tritt aber ein Mangel an Sauerstoff ein, der seinem Leben Gefahr droht. Außerdem wird der Raum, den die verdichtete Luft einnimmt, immer kleiner, je tiefer es geht, und je höher folglich die drückende Wassersäule wird. Beide Uebelstände werden dadurch gehoben, daß von dem Schiff aus, das die Taucherglocke begleitet und an dem sie an starken Ketten hängt, mittelst eines Schlauchs durch ein nach innen sich öffnendes Ventil Luft in die Glocke gepreßt wird. Dadurch kann diese so mit Luft versehen werden, daß noch ein Theil am untern Rande ausströmt; der Taucher kann sich daher nicht allein ganz bequem in der Glocke bewegen, sondern es wird ihm dadurch auch fortwährend der nöthige Sauerstoff zugeführt, indem die verbrauchte Luft durch frische, gesunde Luft ersetzt wird. Wenn sich die Taucher von der Glocke entfernen wollen, ziehen sie eine aus luftdichtem Zeug verfertigte Kappe über den Kopf, die rings um den Hals gut anschließt, vorn mit einer luftdicht eingesetzten Glasscheibe versehen ist und durch einen Schlauch mit der Luft in der Glocke in Verbindung steht.

Will der Taucher, daß die Glocke eine andere Stellung erhalte oder in die Höhe gezogen werde, so benachrichtigt er die Mannschaft im Schiff hievon durch Schläge, welche er mit einem Hammer auf die Glocke führt, nud deren Schall durch die Kette, an der die Glocke hängt, bis zur Oberfläche des Wassers fortgeleitet wird.

Dritter Abschnitt:

Hydraulik

oder

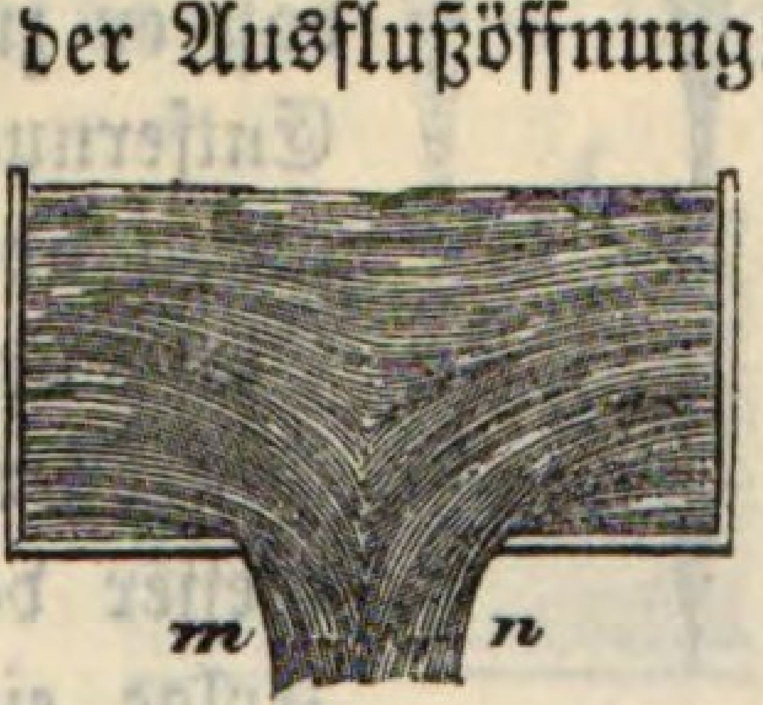
Lehre von der Bewegung flüssiger Körper.

Ausfluß des Wassers aus Gefäßen.

Man hat gefunden, daß die Geschwindigkeit, mit welcher Wasser aus einem Gefäß durch eine Oeffnung am Boden ausfließt, so groß ist, als diejenige, welche es durch den freien Fall durch die ganze Druckhöhe, d. h. von seinem Spiegel bis zur Ausflußöffnung, erlangt haben würde. Kennt man diese Geschwindigkeit und die Größe der Oeffnung, so läßt sich die Ausflußmenge in einer bestimmten Zeit berechnen. Dieselbe ist nämlich gleich dem Produkt aus dem Querschnitt der Oeffnung und dem Weg, den das Wasser bei gleichförmiger Bewegung mit seiner Ausflußgeschwindigkeit in der gegebenen Zeit zurücklegen würde. Hat das Wasser z. B. eine Ausflußgeschwindigkeit von 12 Fuß, was nach dem Obigen und nach den Fallgesetzen (Buch II. S. 70) der Fall ist, wenn die Druckhöhe $\frac{12 . 12}{2 . 30} = 2{,}4$ Fuß beträgt, so beträgt die Ausflußmenge bei einer Mündung von 25 Qu.Zoll Querschnitt in der Sekunde $12 . 0{,}25 = 3$ Kub.F., und in der Stunde $12 . 0{,}25 . 60 . 60 = 10800$ Kub.F.

Hierbei ist angenommen, daß die Ausflußgeschwindigkeit und folglich auch das Niveau des Wassers im Gefäß während der ganzen Dauer des Ausflusses gleich bleibt; findet kein Zufluß von oben Statt, so sinkt der Wasserspiegel allmälig herab, und der Ausfluß geschieht mit verzögerter Bewegung.

Die hier berechnete Ausflußmenge wird jedoch in Wirklichkeit nie ganz erreicht, weil das Herbeiströmen der Wassertheilchen zur Oeffnung eine Zusammenziehung des Strahls verursacht, wodurch sein Querschnitt mn vor der Mündung kleiner wird, als der Querschnitt der Ausflußöffnung.



Außerdem bedingt die Reibung und die Adhäsion der Wassertheilchen an den Wänden des Gefäßes und am Rande der Mündung eine Verminderung der Ausflußgeschwindigkeit. In Folge dieser nachtheiligen Umstände beträgt die wirkliche Ausflußmenge nur einen gewissen Bruchtheil von der

oben berechneten, der je nach der Gestalt und Größe der Mündung verschieden groß ist. Eine Oeffnung in einer dünnen Platte z. B. liefert nur 0,62, eine cylindrische Ansatzröhre von 2 bis 3 Zoll Durchmesser und einer zwei- bis dreimal so großen Länge 0,82, eine konische Ansatzröhre von der Gestalt des Wasserstrahls zunächst an der Mündung, wenn dabei der kleinere Querschnitt der Röhre als Ausflußöffnung in Rechnung gezogen wird, 0,92 der theoretischen Ausflußmenge u. s. f. Diese Bruchzahl heißt der Ausflußkoeffizient.

Wenn wir zwei Wassertropfen hinter einander von einer größeren Höhe herunterfallen lassen, so daß der zweite 1 Sekunde später anfängt zu fallen, als der erste, so eilt nach den Fallgesetzen der zuerst abgegangene, wenn wir den Luftwiderstand nicht in Betracht ziehen, dem nachfolgenden in der ersten Sekunde um 15′, in der zweiten um 45′, in der dritten um 75′ ꝛc. voraus. Lassen wir daher statt einzelner Tropfen einen ununterbrochenen Strahl ausfließen, so nimmt die in der ersten Sekunde ausgeflossene Wassermenge am Ende dieser Zeit eine Länge von 15, am Ende der zweiten Sekunde eine Länge von 45, am Ende der dritten Sekunde eine Länge von 75 Fuß ꝛc. ein. Im gleichen Verhältniß verlängert sich der Wasserstrahl in kleineren Zeittheilchen: im zweiten Zeittheilchen ist dieselbe Wassermenge auf das Dreifache, im dritten auf das Fünffache von derjenigen Länge vertheilt, die sie im ersten Zeittheilchen eingenommen hat.

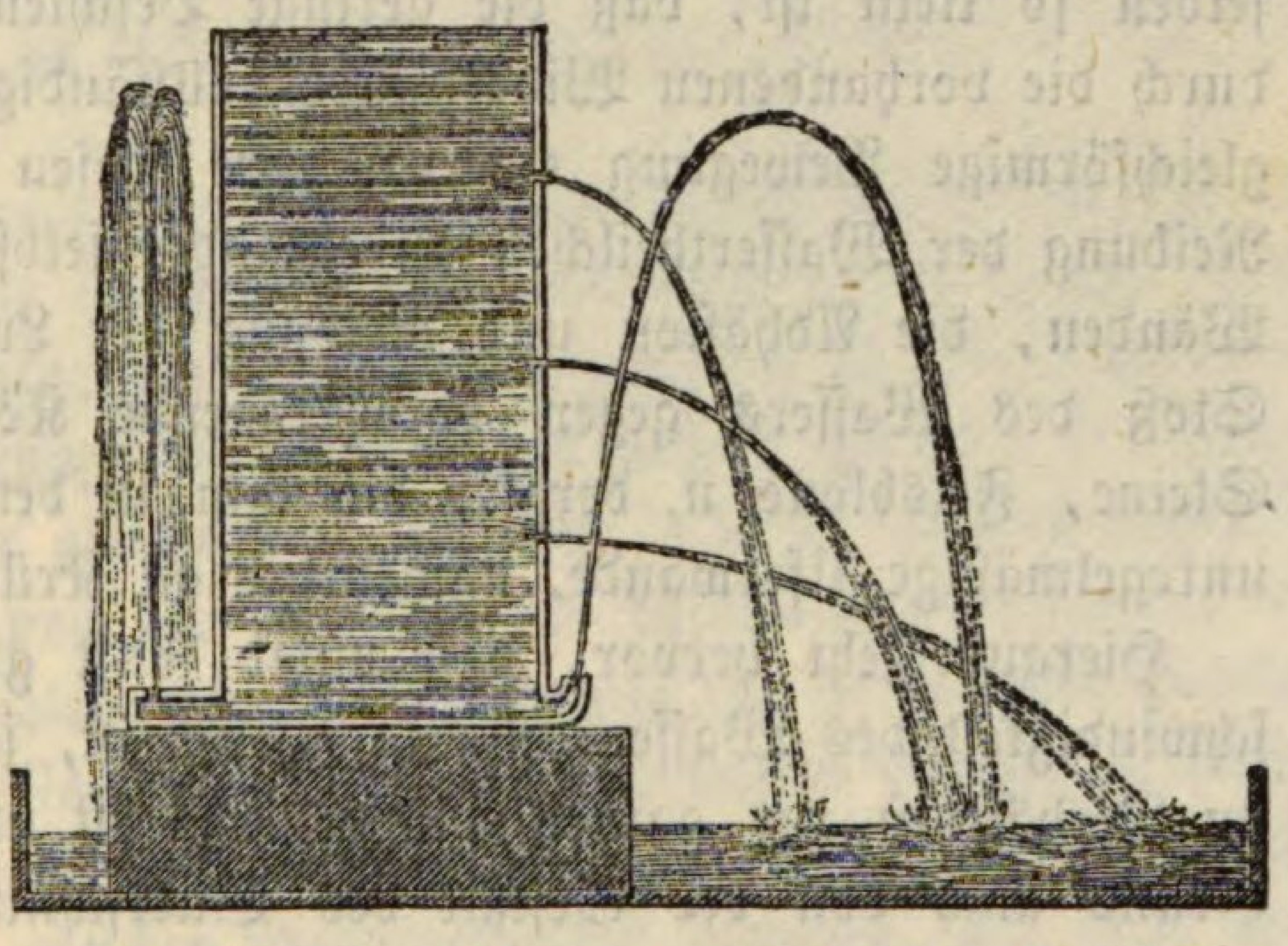


Hieraus erklärt sich die Erscheinung, daß ein senkrecht herabfallender Wasserstrahl sich immer mehr zusammenzieht und dünner wird, je weiter er sich von der Ausflußöffnung entfernt; sei es nun, daß die einzelnen Wassertheilchen unter sich im Zusammenhang bleiben, und sich zu immer längeren Fäden ausziehen, sei es, wie nach den von Savart angestellten Untersuchungen mit Gewißheit angenommen werden darf, daß der Zusammenhang des Wasserstrahls nur ein scheinbarer ist, und daß sich derselbe in Wirklichkeit in einzelne Tropfen auflöst, die mit der Tiefe des Falls in immer größere Entfernungen auseinander rücken.

Betrachten wir den Wasserstrahl näher, so erkennen wir, daß er zunächst unter der Ausflußöffnung, bis auf eine gewisse Entfernung von derselben, klar und durchsichtig ist, weiter unten aber trübe wird und regelmäßige Ausbauchungen und Einschnürungen, Knoten, zeigt, die um so zahlreicher sind, je größer die Ausflußgeschwindigkeit und je kleiner der Durchmesser der Ausflußmündung ist. Diese Knoten entstehen in Folge einer fortwährenden Umbildung der einzelnen Wasser-

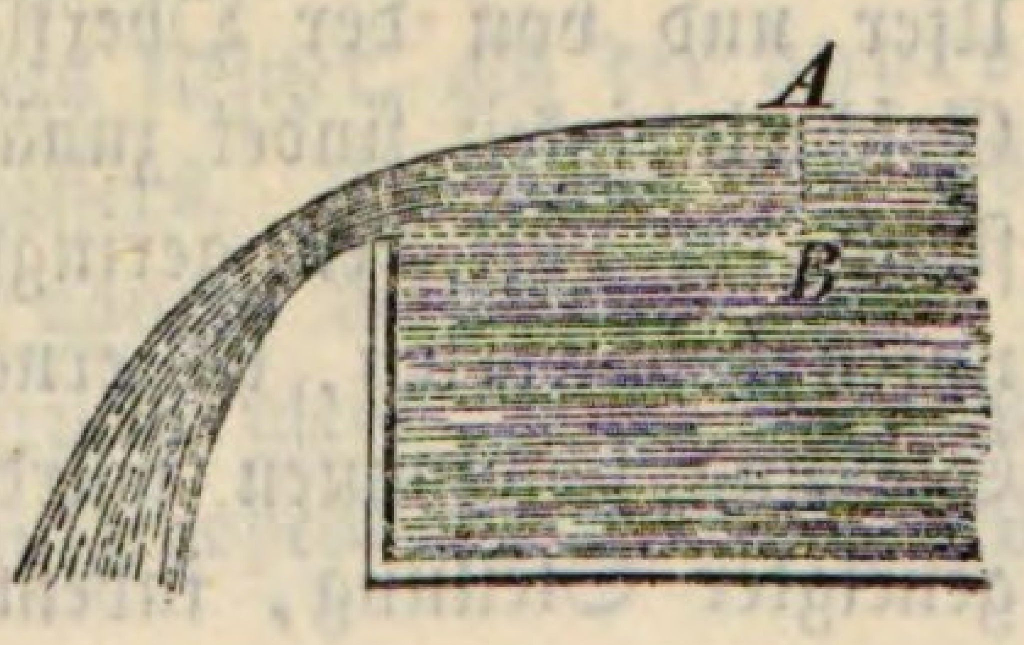
tropfen, bei welcher sich ihr Querdurchmesser beständig verändert, indem sie bald die regelmäßige Kugelform, bald eine in die Länge gezogene, nach oben oder nach unten verdickte, birnförmige Gestalt, wie man sie bei langsamer Bildung einzelner Tropfen stets beobachten kann, annimmt u. s. f. Diese Umbildung der einzelnen Wassertropfen ist am obersten, durchsichtigen Theile des Strahls, wo er noch ein zusammenhängendes Ganze bildet, an leichten ringförmigen Erhöhungen kaum zu erkennen, tritt aber da, wo sich der Strahl in einzelne Tropfen auflöst, um so deutlicher hervor.

Ist die Ausflußöffnung in einer Seitenwand des Gefässes angebracht, so tritt der Strahl ebenfalls mit einer Geschwindigkeit aus gleich derjenigen, welche ein Körper durch den freien Fall vom Wasserspiegel bis zur Ausflußmündung erreicht. Die einzelnen Wassertheilchen folgen nach ihrem Austritt aus dem Gefäß den Gesetzen der Wurfbewegung, d. h. es beschreibt jedes für sich (Buch I. S. 95 und 104) eine Parabel; es nimmt daher auch der ganze Strahl die Gestalt einer Parabel an, deren besondere Form von der Größe der Ausflußgeschwindigkeit und der Richtung, in welcher der Austritt geschieht, abhängig ist. In unserer Zeichnung sind mehrere Strahlen abgebildet, die verschiedenen Ausflußgeschwindigkeiten und verschiedenen Richtungen entsprechen.



Die am untern Rand einer Oeffnung austretenden Wassertheilchen haben nach dem Obigen die größte Ausflußgeschwindigkeit, die übrigen eine um so geringere, je weiter oben ihr Austritt stattfindet. Bei Oeffnungen, die in senkrechter Richtung keine große Ausdehnung haben, kann indessen ohne merklichen Fehler als mittlere Ausflußgeschwindigkeit für den ganzen Strahl die der Mitte der Mündung entsprechende in Rechnung genommen werden.

Bildet die Ausflußöffnung einen sogenannten Ueberfall, so fängt der Wasserspiegel schon eine Strecke oberhalb derselben sich zu senken an. Für die Bestimmung der Ausflußmenge nimmt man in diesem Fall die Höhe des Wasserspiegels vor der Senkung, also AB, und nicht die Dicke des Strahls senkrecht über dem untern Rand



der Oeffnung, und als Ausflußkoeffizient die Zahl 0,4 bis 0,44 in Rechnung, die kleinern Werthe für schmale, die größern für breite Oeffnungen; 0,44 gilt für Ueberfälle, welche die ganze Breite des Zuflußkanals einnehmen, in welchem Fall der Strahl von der Seite her keine Zusammenziehung erleidet.

Bewegung des Wassers in Kanälen, Flüssen und Röhrenleitungen.

Wenn eine Kugel ohne Reibung über eine schiefe Ebene hinabrollt, so nimmt sie gleich einem freifallenden Körper eine beschleunigte Bewegung an. Mit einer solchen sind die Wassertheilchen zu vergleichen, die in Kanälen und Flüssen über schiefe Bahnen hinabgleiten. Dennoch findet hier nur selten, und höchstens stellenweise, eine beschleunigte Bewegung des Wassers Statt, weil in der Regel die Neigung oder der Fall derselben so klein ist, daß die geringe Beschleunigung der Wassertheilchen durch die vorhandenen Widerstände vollständig aufgehoben wird und eine gleichförmige Bewegung eintritt. Zu diesen Widerständen gehören die Reibung der Wassertheilchen an einander selbst, am Boden und an den Wänden, die Adhäsion und Reibung der Luft auf der Oberfläche, der Stoß des Wassers gegen hervorragende Körper, wie Wasserpflanzen, Steine, Felsblöcke u. dergl., die ihm in den Weg treten, sowie gegen unregelmäßige Uferwände, namentlich an Krümmungen.

Hieraus geht hervor, daß unter sonst gleichen Umständen die Geschwindigkeit des Wassers um so größer ist, je kleiner die benetzte Fläche im Verhältniß zur ganzen Wassermasse ist und daß sie aus eben diesem Grund auch von der Gestalt des Querschnitts oder von dem Profil der Wasserleitung und von der Höhe des Wasserstandes abhängt. Daher fließt das Wasser, den gleichen Fall vorausgesetzt, in tiefen Kanälen und Flüssen schneller als in seichten, bei Hochwasser rascher als bei niedrigem Wasserstand; Kanäle von halbkreisförmigem Querschnitt sind für die Bewegung des Wassers günstiger als solche mit geradlinigem Profil u. s. f.

Die Verzögerung der Bewegung des Wassers pflanzt sich in Folge der Reibung der Wassertheilchen an einander auch auf solche Theile fort, die mit Boden und Wänden und mit der Luft an der Oberfläche nicht unmittelbar in Berührung stehen. Aus diesem Grund hat das Wasser in Kanälen und Flüssen in verschiedener Entfernung vom Boden, vom Ufer und von der Oberfläche verschiedene Geschwindigkeit. Die größte Geschwindigkeit findet zunächst unter der Oberfläche Statt, da der Widerstand der Luft den geringsten Einfluß ausübt. Setzt man daher einen unten beschwerten, hölzernen Stab, der in ruhigem Wasser in vertikaler Stellung schwimmen würde, in fließendes Wasser, so schwimmt er in geneigter Stellung, indem seine untern Theile gegen die obern etwas

zurückbleiben. Dieselbe Ursache macht, daß das Wasser, wenn das Flußbett geradlinig und einigermaßen eben ist, in der Mitte zwischen den beiden Ufern des Flusses, im Stromstrich, die größte Geschwindigkeit hat. Bei gekrümmten Ufern grabt sich das Wasser gewöhnlich am konkaven Ufer das tiefste Bett, weßhalb auch der Stromstrich sich dieser Seite nähert.

Wenn aus einem Gefäß durch eine lange horizontale Röhre Wasser ausfließt, so ist seine Geschwindigkeit beim Austritt kleiner, als sie nach dem oben aufgestellten Gesetz bei der vorhandenen Druckhöhe sein sollte. Da nämlich das Wasser der ganzen Länge der Röhre nach Reibungswiderstände zu überwinden hat, die um so größer sind, je kleiner der Durchmesser der Röhre ist, so wird dadurch ein gewisser Theil des Wasserdrucks aufgezehrt, und nur der Rest dieses Drucks ertheilt dem Wasser seine Geschwindigkeit. Es könnte demnach der Röhre eine solche Länge gegeben werden, daß der Wasserdruck durch die Widerstände am Ende ganz aufgehoben würde: in diesem Fall könnte das Wasser nur tropfenweise austreten.

Der Wasserdruck nimmt hiernach gegen die Ausflußmündung hin ab, und es müßte folglich die Geschwindigkeit des Wassers in jedem Punkt der Röhre eine andere sein; da dies aber unmöglich ist, so nimmt das Wasser in der ganzen Länge der Röhre eine gewisse gleiche, mittlere Geschwindigkeit an. Der gleiche Fall tritt ein in schief abwärts liegenden Röhren, wo, abgesehen von der Wirkung der Reibungswiderstände, das Wasser in Folge der beschleunigten Fallbewegung in verschiedenen Punkten der Röhrenleitung ebenfalls verschiedene Geschwindigkeit annehmen müßte.

Denken wir uns die Reibungswiderstände ganz aufgehoben, so müßte sich das Wasser mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen, wie beim Ausfluß aus einer dünnen Wand, wo der ganze Druck des Wassers zur Bewegung desselben verwendet wird. Schließen wir dagegen die Ausflußmündung und heben dadurch die Bewegung des Wassers auf, so haben die Röhrenwandungen den ganzen Druck des ruhigen Wassers zu ertragen. Bewegt sich endlich das Wasser in Folge der Bewegungswiderstände oder des durch theilweisen Verschluß der Mündung beschränkten Ausflusses langsamer, als es der vorhandene Wasserdruck verlangt, so macht sich derjenige Theil desselben, welcher nicht zur Bewegung des Wassers verwendet wird, als ein Druck auf die Röhrenwandungen geltend. Dieser Druck des fließenden Wassers auf die Wände der Röhre, den man den hydrodynamischen nennt, ist somit stets kleiner, als der hydrostatische, d. h. der Druck des ruhigen Wassers. Da nach dem Obigen die Geschwindigkeit des Wassers längs der ganzen Röhre und daher auch der darauf verwendete Theil des Wasserdrucks gleich groß ist, dagegen der durch die Reibungswiderstände nicht aufgehobene Theil desselben gegen

die Ausflußmündung hin immer kleiner wird, so muß nothwendig auch der hydrodynamische Druck gegen das Ende der Röhre hin immer abnehmen und an der Ausflußstelle, wo das Wasser keinen Widerstand mehr zu überwinden hat, gleich Null sein.

Stoß des Wassers.

Wenn fließendes Wasser auf eine feste Wand stößt, deren Ebene senkrecht auf der Richtung seiner Bewegung steht, so übt es auf dieselbe einen Stoß aus, der um so größer ist, je größer die vom Strahl getroffene Fläche und je größer die Geschwindigkeit des Wassers ist. Steht die Wand mitten im fließenden Wasser, so daß dieses seitlich abfließen kann oder ist die von einem abgesonderten Strahl getroffene Fläche nicht größer als der Querschnitt des Strahls, so übt das Wasser nicht seine volle Kraft auf die Wand aus, weil es, indem es nach den Seiten hin ausweicht und die Wand verläßt, auch nach dem Stoß noch einen Theil seiner Geschwindigkeit behält. Anders verhält es sich, wenn ein Wasserstrahl auf eine Fläche stößt, welche seinen Querschnitt um ein Bedeutendes, etwa um das Sechs- bis Achtfache, übertrifft: in diesem Fall verliert das Wasser, bis es, zur Seite ausweichend, am Rand der Fläche ankommt, seine ganze Geschwindigkeit und daher auch seine ganze lebendige Kraft, und fällt senkrecht herab.

Steht die gestoßene Wand nicht senkrecht, sondern schief auf der Richtung des bewegten Wassers, so ist die Wirkung desselben eine bedeutend geringere, da seine Bewegung in zwei Bewegungen, nämlich in eine normal auf der Stoßfläche stehende und in eine dieser parallele zerlegt werden kann (Buch II. S. 61); der Stoß des Wassers gegen die Wand erfolgt daher nur in Folge der ersteren Composante seiner Bewegung.

Weicht endlich die gestoßene Wand dem Wasser im Sinne seiner Bewegung aus, wie dieß z. B. bei den Schaufeln mancher Wasserräder der Fall ist, so findet nur dann ein Stoß statt, wenn die Geschwindigkeit der Wand kleiner ist, als die des Wassers. Bei der Ermittlung der Wirkung des Wasserstoßes ist alsdann nicht die absolute Geschwindigkeit des Wassers, sondern seine relative, d. h. der Ueberschuß seiner Geschwindigkeit über die der ausweichenden Wand in Rechnung zu ziehen.

Wellenbewegung des Wassers.

Wenn wir einen Stein in ruhiges Wasser werfen, so entsteht eine Reihe kreisförmiger Wasserwälle, welche durch entsprechende Vertiefungen von einander getrennt sind, und welche alle ihren Mittelpunkt an der Stelle haben, wo der Stein untergesunken ist. Diese Hebungen und Senkungen des Wassers nennt man **Wellen.** Jede Welle besteht aus

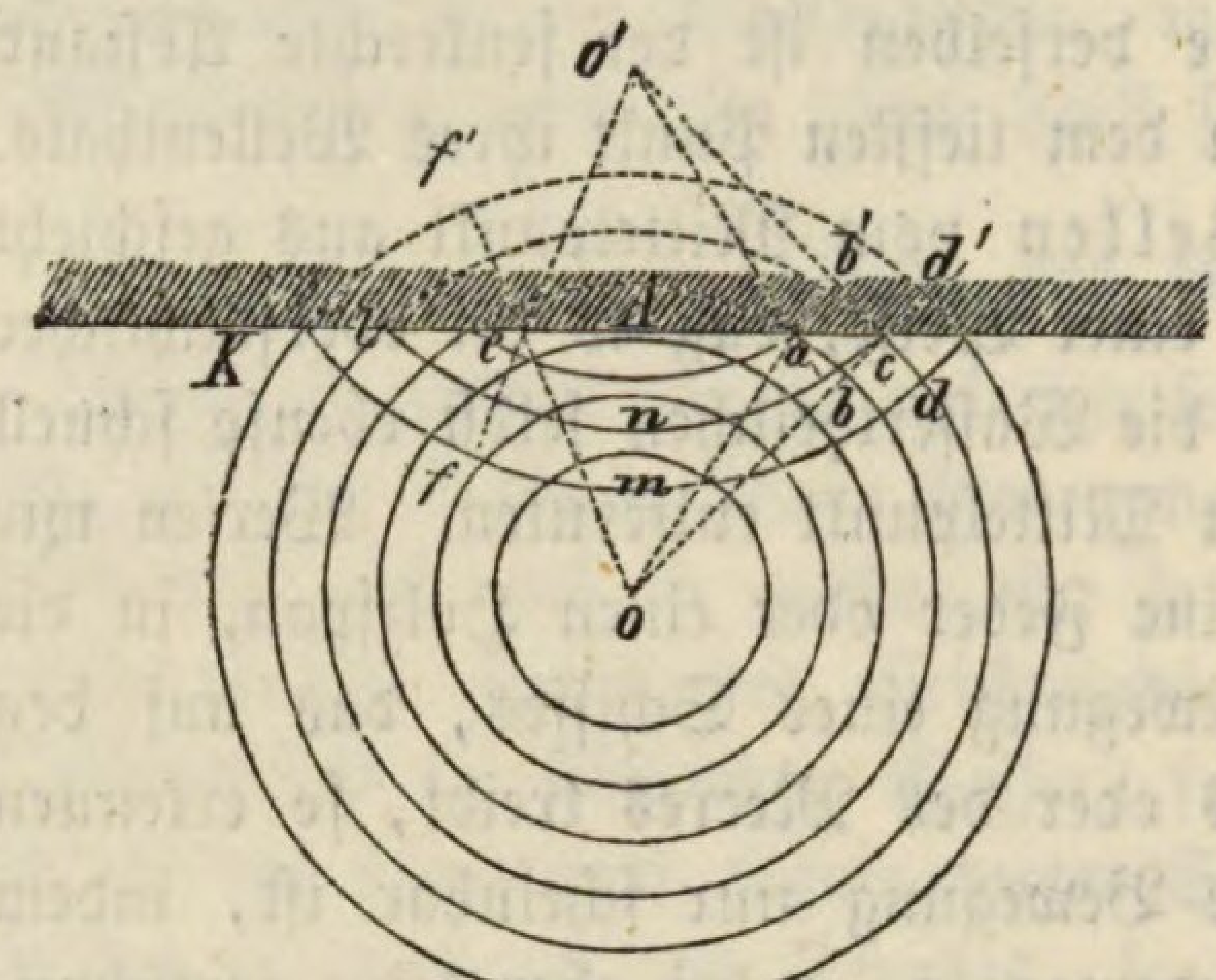
einem Wellenberg und einem Wellenthal; die Breite einer Welle ist demnach gleich der Breite eines Wellenbergs und eines Wellenthals zusammengenommen und die Höhe derselben ist der senkrechte Abstand des Gipfels ihres Wellenberges von dem tiefsten Punkt ihres Wellenthals.

Die Fortpflanzung der Wellen vom Mittelpunkt aus geschieht mit großer Geschwindigkeit und in einer Weise, daß es bei oberflächlicher Betrachtung scheint, als wenn sich die Wassertheilchen selbst ebenso schnell in der Richtung des Strahls vom Mittelpunkt entfernten. Werfen wir aber einen leichten Körper, z. B. eine Feder oder einen Holzspan, in die Kreise, oder betrachten wir die Bewegung eines Schiffes, das auf den höheren Wellen eines großen See's oder des Meeres treibt, so erkennen wir alsbald, daß die fortschreitende Bewegung nur scheinbar ist, indem jene Gegenstände zwar auf und niedertanzen, dabei aber keine fortschreitende Bewegung annehmen.

Da wo der Stein einsinkt, wird das Wasser niedergedrückt; in Folge dessen heben sich ringsum die angrenzenden Wassertheilchen. Diese ziehen bis auf eine gewisse Entfernung ihre Nachbartheilchen mit sich in die Höhe, indem sie ihnen durch Reibung und Adhäsion ihre aufsteigende Bewegung mittheilen: es entsteht ein Wellenberg; rings um diesen tritt eine Senkung des Wassers ein und es bildet sich ein Wellenthal. Das niedersteigende Wasser verdrängt tieferliegende Wassertheilchen; diese weichen aus, heben sich und bilden nach außen einen zweiten Wellenberg, der, wie oben, die Entstehung eines neuen Wellenthals veranlaßt: so bildet sich in rascher Folge eine weithin sich ausbreitende Reihe von Wellen, deren Höhe mit der Entfernung vom Mittelpunkt abnimmt, bis sie zuletzt dem Auge nicht mehr sichtbar sind. Sobald das Wasser in einem Wellenberg seine höchste Höhe erreicht hat, sinkt es wieder herab und bildet ein Wellenthal, während umgekehrt die Wellenthäler sich in Wellenberge verwandeln; auf diese Weise erneuern sich die Wellen von ihrem Ursprung aus fort und fort in immer schwächeren Schwingungen, bis endlich das Wasser ebenfalls vom Mittelpunkt aus ganz zur Ruhe kommt und sein Spiegel wieder glatt erscheint. Genaue Untersuchungen haben gelehrt, daß die Wassertheilchen bei diesem Auf- und Niedersteigen krumme, theils kreisförmige, theils geschlungene, nicht in sich selbst zurückkehrende Bahnen beschreiben, mit deren besonderer Gestalt die Form des Querschnitts der Wellen im Zusammenhang steht.

Stößt eine Welle gegen eine feste Wand, so wird sie von dieser nach den Gesetzen des Stoßes elastischer Körper zurückgeworfen, d. h. jeder Theil derselben prallt so ab, daß sein Einfalls- und sein Ausfallswinkel gleich groß sind. Dadurch entsteht ein entgegengesetztes Wellensystem, dessen Mittelpunkt eben so weit hinter der Wand, als der Ausgangspunkt

des ursprünglichen Systems vor derselben liegt. Ein Theil a einer Welle, der in der Richtung O a ankommt, geht in der Richtung O′ a zurück, und erreicht in derselben Zeit den Punkt b vor der Wand, in der er ohne Stoß den Punkt b′ hinter derselben erreicht haben würde; ebenso wird der Theil c in der Richtung O′ c zurückgeworfen und kommt nach d, während er ohne Stoß nach d′ gelangt wäre; e endlich erreicht in derselben Zeit den Punkt f, in welcher er sich bis f′ fortgepflanzt haben würde, wenn die Wand nicht hindernd in den Weg getreten wäre. Verzeichnen wir auf diese Weise eine größere Reihe von Punkten der einzelnen Wellenringe, so erhalten wir für die Gestalt der zurückgeworfenen Wellen die Kreisbogen K m d, l n b u. s. w., deren Mittelpunkt im Punkt O′ liegt, dessen Abstand O′ A von der Wand gleich O A ist. Ist der feste Gegenstand, an dem sich eine Welle bricht, von geringer Ausdehnung, so wird zwar ein Theil derselben von ihm zurückgeworfen, aber hinter dem Gegenstand ergänzt sich der Wellenring von selbst wieder so vollständig, als wenn er keine Unterbrechung erlitten hätte.



Wenn sich Wellen begegnen, so durchkreuzen sie sich, ohne sich gegenseitig zu zerstören. Da wo zwei Wellenberge zusammentreffen, erhebt sich das Wasser zu einer Höhe gleich der Summe der Höhen der beiden Wellenberge; ein Wellenberg und ein Wellenthal heben sich, je nach ihrer verhältnißmäßigen Größe, entweder theilweise oder auch ganz auf, und zwei Wellenthäler vereinigen sich zu einer Tiefe, welche der Summe ihrer Tiefen gleich ist. Diese Erscheinungen lassen sich leicht durch Versuch zeigen, wenn man auf verschiedene Punkte eines ruhigen Quecksilberspiegels aus einem Papiertrichter feine Quecksilberstrahlen fallen läßt.

Wellen können wir auch dadurch erzeugen, daß wir auf die Oberfläche einer Flüssigkeit blasen: dies thut auch der Wind. Streicht er in horizontaler Richtung sanft über den Spiegel des Meeres hin, so sehen wir dieses nur leicht sich kräuseln. Trifft er aber seine Oberfläche in schiefer Richtung und in stärkeren Stößen, so drückt er das Wasser tiefer nieder und hebt es daneben um so höher empor: das Meer schlägt Wellen. Nun erst kann der Wind seine volle Kraft auf die sich vor ihm erhebenden Wellenberge ausüben; die ganze Wassermasse wird in immer gewaltigere Schwingungen versetzt, bis endlich die hochaufgethürmten Wogen, vom tobenden Sturme gepeitscht, eine solch' riesenhafte Größe erreichen,

daß ganze Schiffe in ihren Thälern verschwinden, wenn sie, mitten durch den furchtbaren Kampf der Elemente von Gipfel zu Gipfel sich schaukelnd, auf der schrecklich rauhen Bahn sich dahin wälzen.

Die Höhe der Meereswellen in der offenen See steigt selten über 20 bis 30 Fuß. Wenn sie aber in heftiger Brandung an steile Uferwände anschlagen und von diesen ebenso gewaltig zurückgeschleudert werden, dann spritzen sie, mit den neuankommenden Wogen in furchtbarer Begegnung zusammenschlagend, zur fünf- und zehnfachen Höhe empor, ehe sie zurück in die eben so schauerlichen Abgründe, zu welchen die sich begegnenden Thäler geworden sind, sich stürzen. So sehen wir im schreckenerregenden Schauspiel der Brandung die obigen Gesetze im großartigsten Maßstab bestätigt.

Das Wasser als bewegende Kraft.

Die Kräfte werden durch die von ihnen geleisteten Arbeiten gemessen. Die Arbeit, welche eine Kraft vollbringt, wird ausgedrückt (s. Buch II. S. 67) durch ein Produkt aus dem Druck, den sie auf den von ihr bewegten Körper ausübt, und dem Weg, den der Körper in Folge dieser Kraft in der Sekunde zurücklegt. Wir legen demgemäß einem Motor eine Kraft von 400 Fußpfunden bei, wenn er im Stande ist, eine Last von 40 Pfd. in der Sekunde 10 F. zu heben, und einem andern Motor eine Kraft von 1000 Kilogramm-Metern, wenn er einen Körper mit einer Geschwindigkeit von 5^m fortbewegt, während er zugleich einen Druck von 200 K. auf denselben ausübt.

Ein Rohr von S Qu.F. Querschnitt und von h′ Höhe werde durch Zufluß von oben stets voll mit Wasser erhalten, während dieses unten mit einer entsprechenden Geschwindigkeit von c′ ausfließt. Eine Wassersäule von den genannten Dimensionen übt aber nach dem Früheren auf ihren Boden einen Druck von 70. S. h Pfd. aus, und es ist demnach die hier gebotene Wassermenge im Stande, einen an der Ausflußöffnung der Röhre ihr im Wege stehenden Gegenstand mit einem Druck von 70. S. h Pfd. und mit einer Geschwindigkeit von c′ fortzuschieben; oder mit andern Worten: das Maß dieser Wasserkraft ist 70. S. h. c F.Pfd.

Das Gewicht der in der Sekunde ausfließenden Wassermenge ist aber in diesem Fall 70. S. c Pfd.; setzen wir statt dieses Ausdrucks den Buchstaben G (Gewicht), so haben wir anstatt 70. S. h. c F.Pfd. als Maß der Wasserkraft den bequemeren Ausdruck G. h F.Pfd. Liefert also z. B. eine Wasserkraft in jeder Sekunde 200 Pfd. Wasser und ist die Höhe der drückenden Säule 20′, so beträgt dieselbe 4000 F.Pfd. oder ungefähr 8 Pferdekräfte.

Kennt man nur die Ausflußgeschwindigkeit, so läßt sich die entspre-

chende Höhe nach S. 70 des zweiten Buches berechnen; ist dieselbe z. B. 20′, so ist die in Rechnung zu nehmende Höhe $\frac{20 . 20}{2 . 30} = 6^2/_3{'}$.

Wir stellen daher den Satz auf:

Die Größe einer beliebigen Wasserkraft wird gefunden, wenn man die in der Sekunde zur Wirkung kommende, in Gewicht ausgedrückte Wassermenge mit der Höhe, welche der Ausflußgeschwindigkeit entspricht, d. h. mit dem Gefälle, multiplicirt.

Bei der Messung einer Wasserkraft hat man also zwei Dinge zu bestimmen: das in der Sekunde verfügbare Wasserquantum und das Gefälle.

Die **Wassermenge** berechnet man gewöhnlich aus dem Querschnitt des Zuflußkanals und aus der mittleren Geschwindigkeit des Wassers in demselben. Hat der Querschnitt des Kanals die Gestalt eines Rechtecks, so ist für den Fall, daß das Wasser 4′ hoch in demselben steht, bei einer Breite von 8′, der Querschnitt 32 Quadr.Fuß. Ist dabei die mittlere Geschwindigkeit des Wassers 5′, so werden in jeder Sekunde 70 . 5 . 32 oder 11200 Pfd. Wasser geliefert.

Um die Geschwindigkeit des fließenden Wassers zu finden, wendet man am Einfachsten eine halb gefüllte Flasche an; man wirft sie in das Wasser, und beobachtet mittelst einer genauen Uhr die Zeit, in welcher die Flasche eine gemessene Strecke durchschwimmt. Braucht dieselbe z. B. 20 Sek., um eine Strecke von 120′ zurückzulegen, so ist die Geschwindigkeit des Wassers $\frac{120}{20}$ oder 6′. Hiedurch erhält man aber die größte Geschwindigkeit, welche der Strom hat, nämlich die an der Oberfläche. Die mittlere Geschwindigkeit beträgt nach den angestellten Untersuchungen nur 80 bis 85 Procent von der obigen. Diese kann auch unmittelbar durch Versuch gefunden werden, indem man einen fast bis auf den Boden einsinkenden Stab oder eine Röhre, oder zwei durch eine Schnur oder eine leichte Kette verbundene Kugeln, von denen die untere vermöge ihres größern Gewichts nahe am Boden schwimmt, als Signale benutzt. Durch solche Versuche findet man aber je nur die Stromgeschwindigkeit an einem bestimmten Punkt der Strombreite. Um die durchschnittliche Geschwindigkeit der ganzen Wassermasse zu erhalten, müssen diese Beobachtungen an mehreren Stellen der Strombreite angestellt und daraus das arithmetische Mittel genommen werden.

Unter den übrigen Mitteln, die Stromgeschwindigkeit zu messen, auf deren Beschreibung wir aber hier verzichten müssen, stehen am häufigsten im Gebrauch: der Woltmann'sche Flügel, Brünings Strommesser, die Pitot'sche Röhre und das Strompendel.

Als wirksames **Gefälle** betrachtet man im Allgemeinen den senkrechten Abstand des Niveau's des Oberwassers von dem des Unterwassers. Es finden jedoch bei einzelnen Wasserwerken kleine Beschränkungen statt, auf die wir später aufmerksam machen werden.

Zur Uebertragung einer Wasserkraft auf die Maschine, welche dadurch in Gang gesetzt werden soll, werden theils Wasserräder, theils Wassersäulen-Maschinen angewendet. Hiebei geht an Kraft etwas verloren, so daß nur noch ein gewisser Bruchtheil derselben auf die eigentliche Maschine übergetragen wird; dieser Bruchtheil ist verschieden je nach der Art der Anlage und dem Bau des Wasserwerks, und der Werth desselben erstreckt sich ungefähr von 0,25 bis 0,85. Die Ursachen dieses Verlustes an Wasserkraft liegen theils in den oft bedeutenden Reibungswiderständen, die zu überwinden sind, theils bei Wasserrädern darin, daß ein Theil des Wassers entweder gar nicht zur Wirkung kommt oder das Rad zu frühe wieder verläßt, und folglich nicht seine ganze lebendige Kraft an dasselbe abgibt. Der letztere Uebelstand findet auch dann statt, wenn das Wasser beim Austreten aus dem Rad noch einen Theil seiner Geschwindigkeit und damit seiner lebendigen Kraft beibehält. Endlich wird bei den meisten Wasserrädern ein nicht unbedeutender Verlust an Kraft dadurch verursacht, daß der Wasserstrahl beim Auffallen auf dieselben durch Stoß eine plötzliche Ablenkung seiner Richtung erleidet.

Die Wasserräder.

Bei den Wasserrädern wirkt das Wasser entweder durch Stoß oder durch Druck oder durch Beides zugleich. Es wird jedoch der Zweck der möglich vortheilhaftesten Benutzung einer Wasserkraft in sehr verschiedenem Grade erreicht, je nachdem das Wasser auf die eine oder andere Art auf die Räder wirkt.

Als Hauptbedingungen einer guten Einrichtung, die sich übrigens schon aus dem oben Gesagten von selbst ergeben, hat man in dieser Beziehung die zwei folgenden festgestellt:

1) Das Wasser muß **ohne Stoß** in das Rad eintreten.

2) **Die Geschwindigkeit** des Wassers bei seinem Austritt aus dem Rad muß **gleich Null** sein.

Theils um bei veränderlichem Wasserstand dem Oberwasser so viel als thunlich ein konstantes Niveau zu geben, theils um ein höheres Gefälle zu erhalten, als es das natürliche Strombett darbietet, bringt man gewöhnlich in passender Entfernung oberhalb des Wasserwerks ein Wehr an, durch welches das Wasser schon an einem höher gelegenen Punkt des Flusses oder Baches aufgestaut wird, und leitet es von dort aus in einem Kanal oder Gerinne von geringerem Gefälle, als es dem

natürlichen Flußbett eigen ist, an den Ort der Benutzung. Der Ausfluß des Wassers aus dem Kanal wird durch eine sogenannte Schütze oder Stellfalle geregelt, oder es wird durch ein Schußgerinne, das ebenfalls nur einer gewissen Menge Wassers den Austritt verstattet, auf das Wasserrad geleitet.

Die Wasserräder werden eingetheilt in vertikale (mit horizontaler Axe) und in horizontale (mit vertikaler Axe). Vertikale Räder können nur angewendet werden, wenn das vorhandene Gefälle eine gewisse Grenze, 30 bis 40 Fuß, nicht übersteigt; bei höhern Gefällen richtet man Horizontalräder ein, die übrigens auch bei niedrigem Gefälle anwendbar sind. Die Horizontalräder haben in der Regel eine sehr große Geschwindigkeit, wodurch sie sich für gewisse Zwecke ganz besonders empfehlen; Vertikalräder müssen, wenn die Wasserkraft möglich vortheilhaft benutzt werden soll, sich langsam bewegen. Hierauf hat man bei der Construktion derselben Bedacht zu nehmen; bei gegebener Wasserkraft und gegebenem Widerstand kann der Geschwindigkeit des Rads (man betrachtet als solche gewöhnlich die Geschwindigkeit der Schaufelmitte) dadurch eine bestimmte Größe gegeben werden, daß man die Dimensionen, insbesondere den Raddurchmesser, entsprechend wählt.

Vertikale Wasserräder.

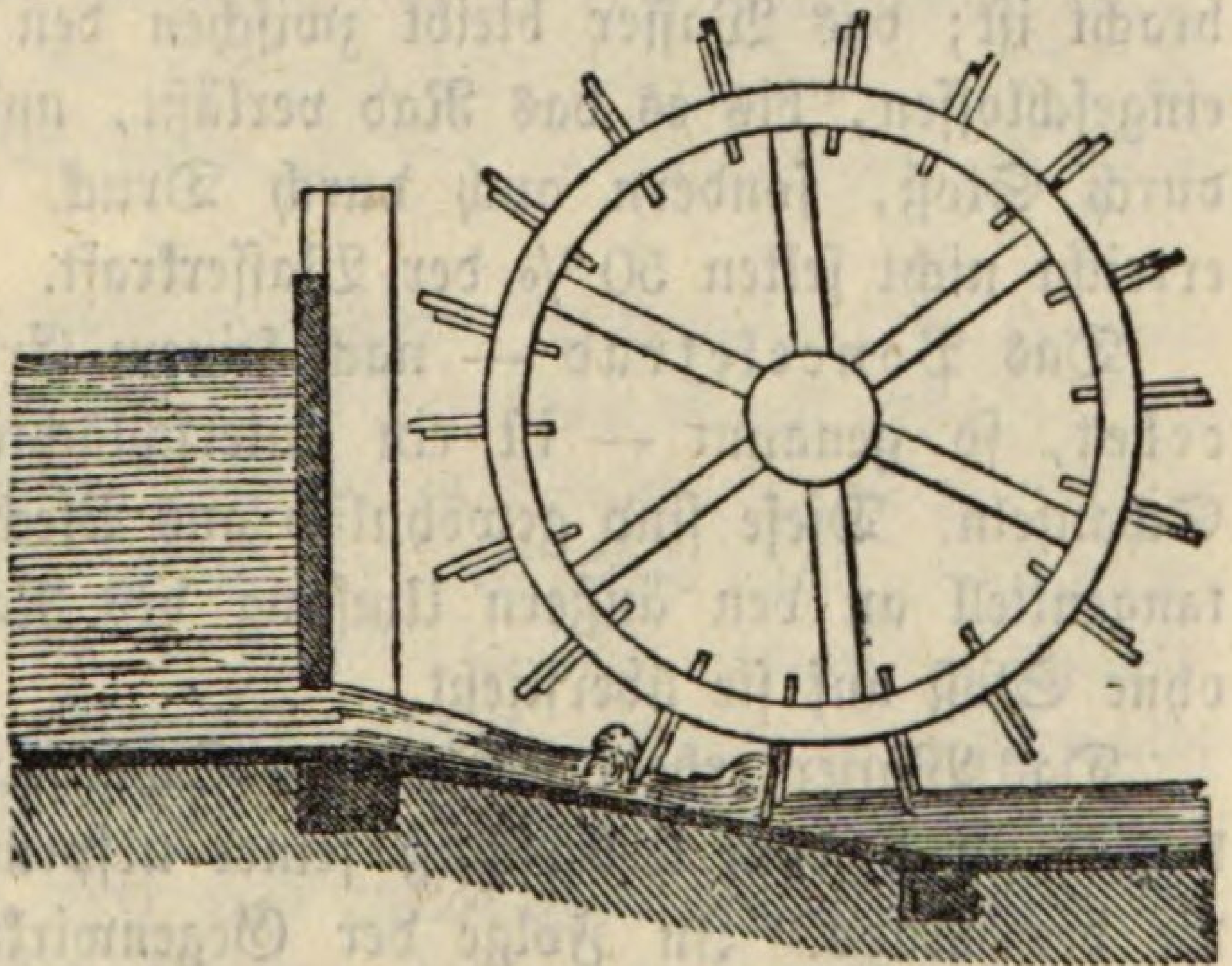
Die vertikalen Wasserräder sind entweder Schaufel- oder Zellenräder; jene sind zunächst auf den Stoß, diese auf den Druck des Wassers berechnet. Die Schaufeln sind bald auf besonderen Radkränzen, bald unmittelbar an den Radspeichen befestigt; ihrer Form nach sind sie entweder eben oder gekrümmt. Räder, bei welchen die Schaufeln zwischen zwei Radkränzen eingesetzt sind, heißen Staberäder; solche dagegen, bei denen sie auf einem einzigen Radkranz befestigt sind, Strauberäder. Die Zellen werden dadurch gebildet, daß zwischen zwei Radkränze, die gegen das Innere des Rads durch den Boden verbunden und abgeschlossen sind, theils ebene, theils krumme Schaufeln, welche sich an den Boden anschließen, eingesetzt werden.

Das Aufschlagwasser trifft das Rad entweder an den tiefsten Stellen, oder es tritt in der Mitte der Höhe oder endlich ganz oben in das Rad ein: hiernach unterscheidet man unterschlächtige, mittel- oder rückenschlächtige und oberschlächtige Wasserräder. Die unterschlächtigen sind Schaufelräder, die oberschlächtigen Zellenräder. Die unterschlächtigen Wasserräder werden da angewendet, wo ein geringes Gefälle, dabei aber eine um so größere Wassermenge zur Verfügung steht; bei höhern Gefällen von 8 bis 10 Fuß an aufwärts, werden mittel- oder oberschlächtige Räder eingerichtet.

Die **unterschlächtigen Wasserräder** hängen entweder frei im Wasser, so daß dieses zu beiden Seiten frei abfließen kann, oder sie sind von den Wänden eines Gerinnes eingeschlossen, wodurch das Wasser zusammengehalten und auf die Radschaufeln geleitet wird. Die Zapfenlager dieser Räder sind häufig so eingerichtet, daß sie mittelst eines sogenannten Pansterzeugs gehoben oder niedergelassen werden können, je nachdem es der Wasserstand verlangt. Man hat unterschlächtige Wasserräder von 12 bis zu 30 Fuß Höhe.

Die Schiffmühlenräder hängen frei im Wasser; die Zapfenlager der Welle befinden sich auf zwei nebeneinander im Strom festgehaltenen Schiffen, auf deren einem zugleich die Mühle eingerichtet ist. Die Räder sind sehr breit und die Schaufeln in der Regel 1 bis 2 Fuß hoch. Statt auf einem besondern Kranz sind die Schaufeln häufig auf den Speichen befestigt; dabei fällt ihre Richtung nicht in die Verlängerung des Halbmessers, sondern sie sind so gestellt, daß sie in ihrem tiefsten Stand sich dem ankommenden Strom entgegenneigen, was den Zweck hat, ihren Austritt aus dem Wasser zu erleichtern. Das Wasser wirkt hier durch Stoß und man erhält die vortheilhafteste Wirkung, wenn die Geschwindigkeit der Schaufeln nahezu die Hälfte der Stromgeschwindigkeit beträgt.

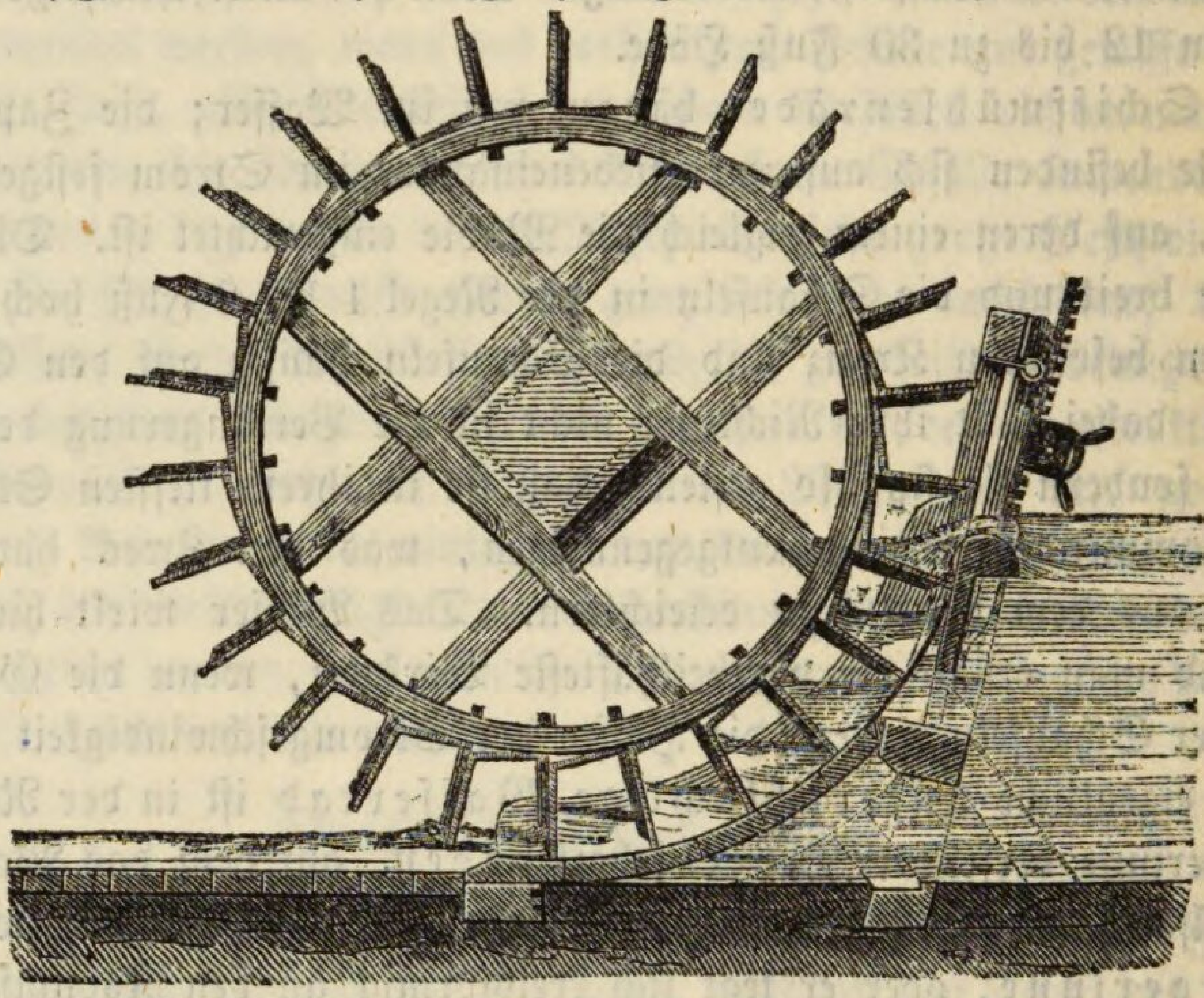
Das eigentliche unterschlächtige Wasserrad ist in der Regel mit einem Gerinne versehen. Der Abschußboden, auf dem das Wasser von der Stellfalle auf das Rad fließt, ist dabei entweder gerade, wie beim Schnurgerinne, oder er legt sich kreisförmig an den Radumfang an, wie beim Kropfgerinne. Bei den Rädern mit Schnurgerinne (s. d. Fig.) wirkt das Wasser nur durch Stoß und behält beim Abfluß noch die Geschwindigkeit der Schaufeln bei; es wirkt daher nur mit seiner relativen Geschwindigkeit, d. h. mit dem Ueberschuß seiner Geschwindigkeit über die der Schaufeln. Der Abschußboden darf nicht zu lang sein, damit die Geschwindigkeit durch Reibung nicht zu sehr geschmälert wird. Die vortheilhafteste Geschwindigkeit der Schaufeln ist auch bei diesen Rädern gleich der Hälfte von der des Aufschlagwassers.



Wir sehen, daß weder das unterschlächtige Rad mit Schnurgerinne, noch das zuvor betrachtete Schiffmühlenrad den oben aufgestellten An-

forderungen an ein gutes Wasserrad entspricht, und es kann daher nicht befremden, daß der Nutzeffekt bei denselben nur 0,25 bis höchstens 0,33 von der Wasserkraft beträgt.

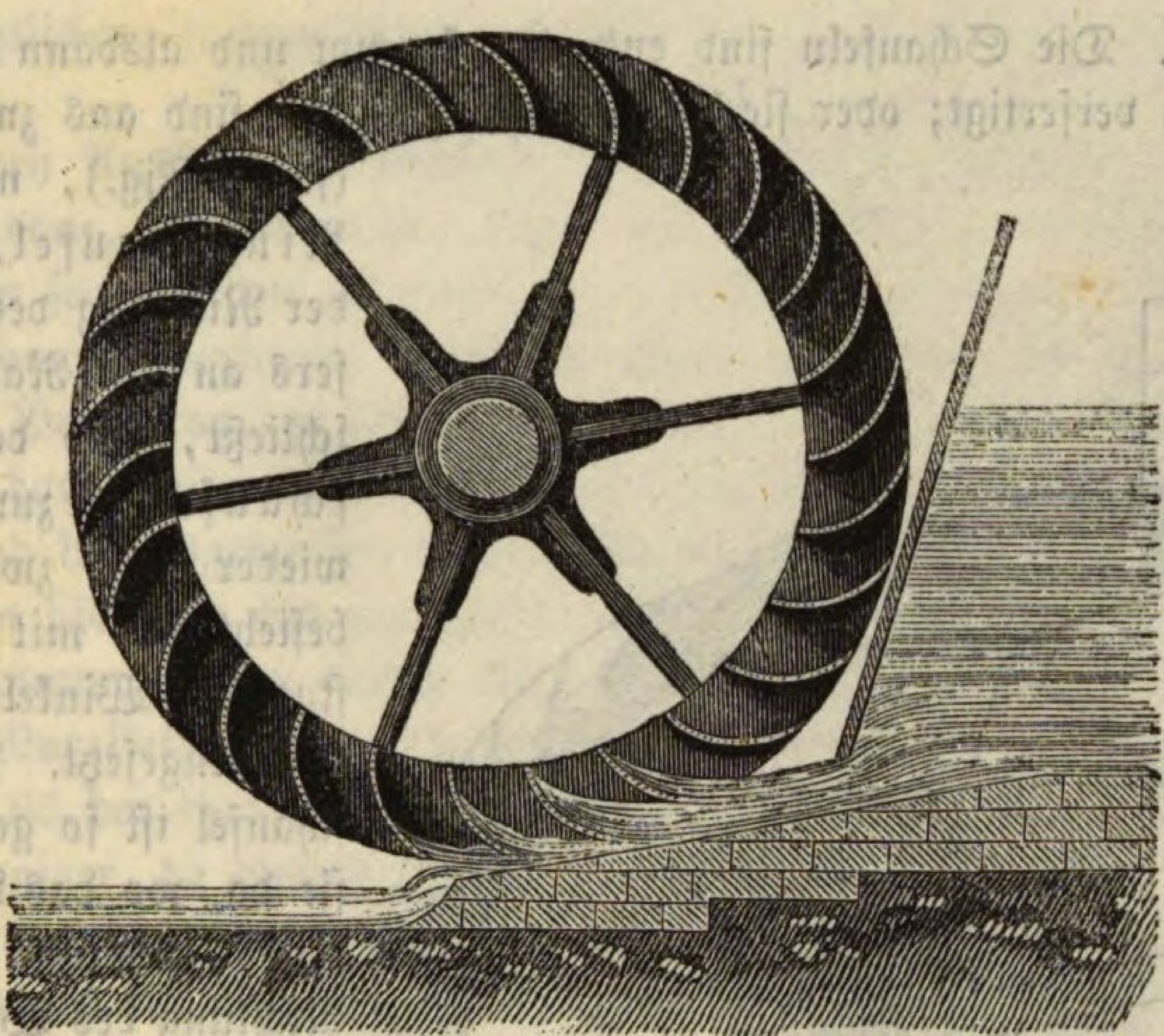
Bei weitem günstiger als diese wirken die Kropfräder oder die unterschlächtigen Räder mit Kropfgerinne. Bei diesen fällt das Wasser aus dem Zuflußkanal unmittelbar auf die Radschaufel, zu welchem Zweck häufig, wie in unserer Zeichnung, eine Ueberfallsschütze ange-



bracht ist; das Wasser bleibt zwischen den Schaufeln und dem Gerinne eingeschlossen, bis es das Rad verläßt, und es wirkt daher nicht allein durch Stoß, sondern auch durch Druck. Der Nutzeffekt dieser Räder erreicht nicht selten 50 % der Wasserkraft.

Das Ponceletrad — nach seinem Erfinder, dem Franzosen Poncelet, so genannt — ist ein unterschlächtiges Wasserrad mit krummen Schaufeln. Diese sind gewöhnlich aus Blech verfertigt und legen sich fast tangentiell an den äußern Umfang des Rades an, so daß das Wasser ohne Stoß auf sie überfließt.

Das Wasser erhebt sich in den Schaufeln mit einer Anfangsgeschwindigkeit gleich dem Ueberschuß seiner ursprünglichen Geschwindigkeit über die des Rads. In Folge der Gegenwirkung der Schwere verliert es aber diese Geschwindigkeit allmälig und sinkt, nachdem diese gleich Null geworden ist, wieder zurück, indem es dabei bis zu seinem Austritt aus der Schaufel die gleiche Geschwindigkeit, mit der es in dieselbe eingetreten ist, aber im entgegengesetzten Sinn, wieder erlangt (Buch II, S. 71). Während der ganzen Dauer seiner auf- und niedersteigenden Bewegung drückt das Wasser auf die Radschaufeln. Soll nun die absolute Geschwin-



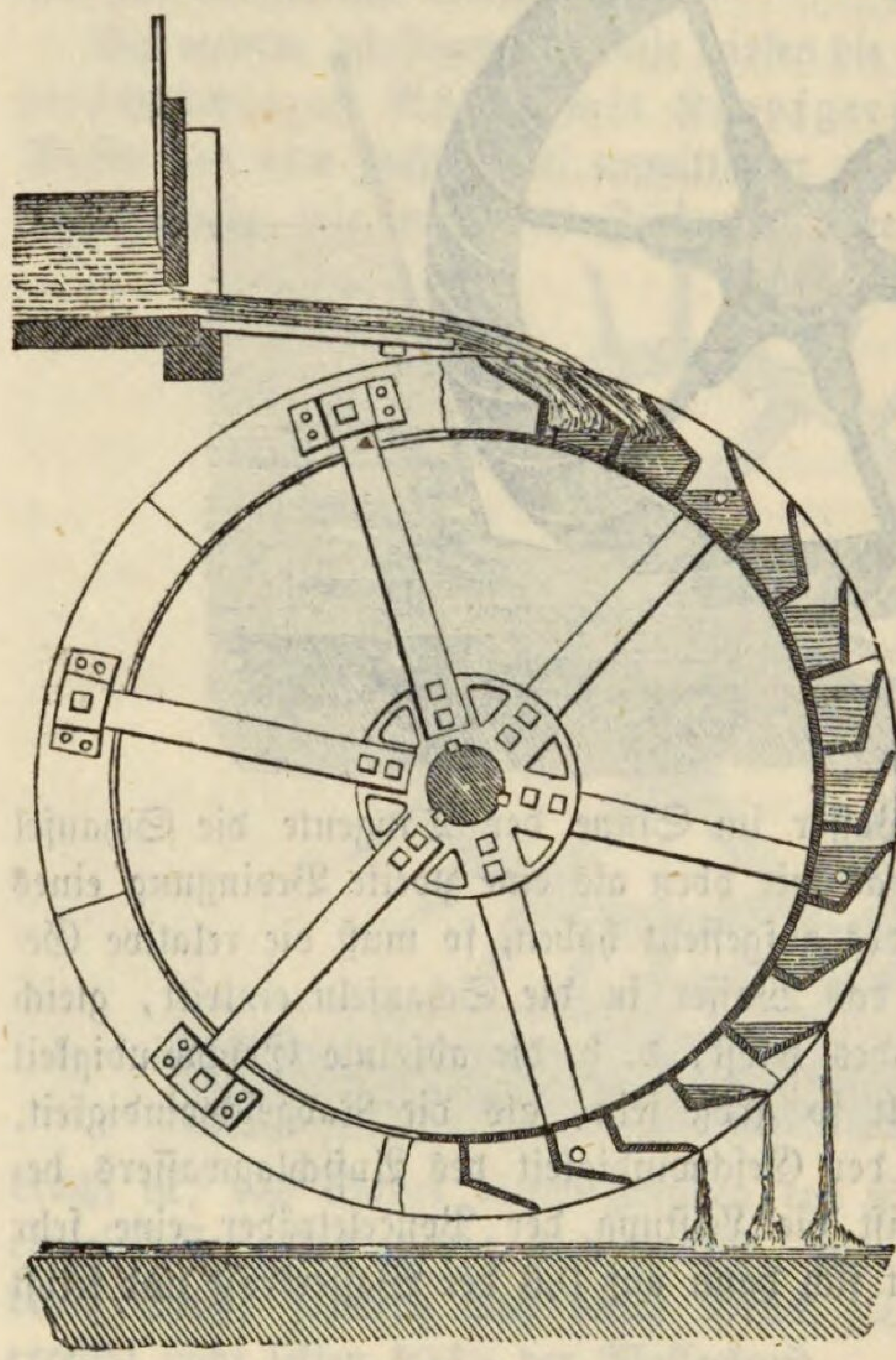
digkeit, mit welcher das Wasser im Sinne der Tangente die Schaufel verläßt, gleich Null sein, was wir oben als eine zweite Bedingung eines wohl konstruirten Wasserrades aufgestellt haben, so muß die relative Geschwindigkeit, mit welcher das Wasser in die Schaufeln eintritt, gleich der Geschwindigkeit des Rades selbst, d. h. die absolute Geschwindigkeit des Aufschlagwassers doppelt so groß sein, als die Radgeschwindigkeit, oder diese muß die Hälfte der Geschwindigkeit des Aufschlagwassers betragen. In diesem Fall ist die Leistung der Ponceleträder eine sehr günstige; der Nutzeffekt stellt sich dann auf 0,6 der Wasserkraft und selbst darüber.

Damit die Schaufeln der unterschlächtigen Wasserräder frei aus dem Hinterwasser austreten, bringt man, obgleich dadurch ein kleiner Theil des Gefälls verloren geht, unmittelbar hinter dem tiefsten Punkt des Rades einen sogenannten Abfall an. Dies ist namentlich dann nothwendig, wenn das Hinterwasser bei starken Regengüssen u. drgl. zuweilen anschwillt.

Mittelschlächtige Wasserräder (rückenschlächtige oder auch halboberschlächtige) heißen solche, bei welchen das Aufschlagwasser in der halben Höhe des Rads, oder auch etwas über oder unter derselben auf das Rad trifft. Sie haben entweder Schaufeln mit Kropfgerinne, und sind dann nichts anders als Kropfräder mit hohem Gerinne; oder, was gewöhnlicher ist, sie sind mit Zellen versehen und schließen sich in ihrer Wirkung den oberschlächtigen Rädern an. Wir erlassen es uns daher, dieselben hier einer besondern Betrachtung zu unterwerfen.

Die **oberschlächtigen Wasserräder** sind Zellenräder. Das Wasser tritt am höchsten Punkt des Rades oder etwas unter demselben ohne

Stoß ein. Die Schaufeln sind entweder krumm und alsdann gewöhnlich aus Blech verfertigt; oder sie bestehen aus Holz und sind aus zwei Stücken



(s. d. Fig.), nämlich der Ringschaufel, die sich in der Richtung des Halbmessers an den Radboden anschließt, und der Stoßschaufel, die zuweilen selbst wieder aus zwei Stücken besteht und mit jener einen stumpfen Winkel bildet, zusammengesetzt. Die Stoßschaufel ist so gestellt, daß sie da, wo das Wasser eintritt, ziemlich genau die Richtung des Wasserstrahls hat, um den Stoß zu vermeiden. Bei dieser Form wird, wie man aus der Figur sieht, der Ausfluß des Wassers verhindert, bis die Zellen fast unten am Grunde angekommen sind.

Da bei den oberschlächtigen Rädern der sogenannte wasserhaltende Bogen durch sein Uebergewicht über den andern leeren Theil die Bewegung bewirkt, so wird im Zuflußkanal nur so viel Gefälle vorbehalten, als nöthig ist, um dem Wasser ungefähr die Geschwindigkeit des Rades zu ertheilen: das ganze übrige Gefälle wird zur Höhe des Rades genommen; doch wird zwischen dem tiefsten Punkt des Rades und dem Unterwasser ein kleiner Zwischenraum, das verlorene Gefälle, gelassen, um dem Rad eine freie Bewegung zu sichern.

Bei der Construktion eines oberschlächtigen Wasserrades ist vornehmlich darauf Bedacht zu nehmen, ihm eine so langsame Bewegung zu geben, als es die übrigen Umstände gestatten, damit das herabsinkende Wasser einen möglich großen Theil seiner lebendigen Kraft auf das Rad übertrage. Denn wie es uns eine um so größere Anstrengung kostet, einen schweren Körper von einer gewissen Höhe herabzuheben, je langsamer dies geschehen muß, so ist auch der Druck, den das in den Zellen eines oberschlächtigen Wasserrades enthaltene Wasser auf das Rad ausübt, um

so beträchtlicher, je langsamer das Rad dem herabsinkenden Wasser ausweicht.

Um den Ausfluß des Wassers aus den Zellen so lang als möglich zu verhindern, ist der untere Theil des wasserhaltenden Bogens häufig mit einem sogenannten Mantel, in der Art eines genau anschließenden Kropfgerinnes, versehen. Auch in dieser Beziehung ist eine möglichst langsame Bewegung des Rades von Werth, da bei großer Geschwindigkeit desselben das Wasser durch die Centrifugalkraft leicht zu frühe über den Zellenrand hinausgeworfen wird. Aus demselben Grund dürfen sich auch die Zellen höchstens bis zur Hälfte mit Wasser füllen, worauf man bei der Bestimmung ihrer Größe Bedacht zu nehmen hat.

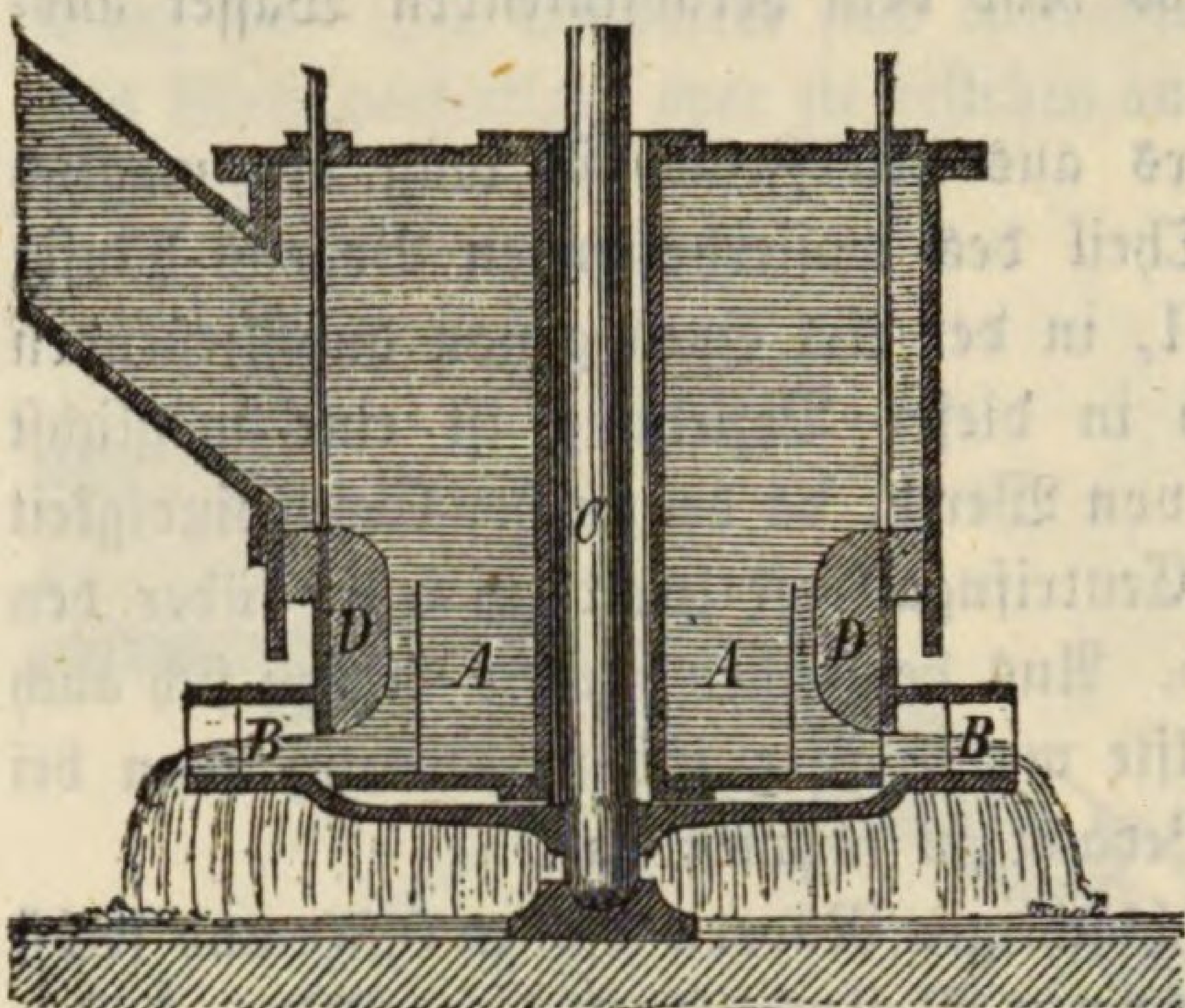
Der Nutzeffekt steigt bei oberschlächtigen Rädern bis zu 0,80 und selbst bis zu 0,85 der theoretisch berechneten Wasserkraft; kleinere Räder leisten etwas weniger, da diese das Wasser nicht so lange behalten, als größere. Diese Räder werden daher hauptsächlich angewendet bei Gefällen von mindestens 15 bis 20 Fuß; die äußerste Grenze bildet ein Gefälle von 40 bis 50 Fuß. Bei der Bestimmung der Leistung der oberschlächtigen Räder nimmt man die ganze Höhe zwischen Ober- und Unterwasser als Gefälle in Rechnung.

Horizontale Wasserräder.

Die horizontalen Wasserräder zeichnen sich durch kleine Dimensionen und große Umdrehungsgeschwindigkeit aus. Das Wasser wirkt auch bei diesen entweder durch Stoß, wie bei den Muschelrädern, oder durch Druck, wie bei den sogenannten Turbinen, von denen wir drei der am häufigsten im Gebrauch stehenden, nämlich die Fourneyron'sche, die Jonval'sche und die schottische näher betrachten wollen.

Das **Muschelrad** wird häuptsächlich im südlichen Frankreich und in den Pyrenäen da angewendet, wo über geringe Wassermengen von sehr hohem Gefälle verfügt werden kann. Der Wasserstrahl wird in horizontaler Richtung auf die muschel- oder löffelförmigen Radschaufeln geleitet, die unmittelbar in die Welle eingesetzt sind. Ihre Anwendung beschränkt sich fast ausschließlich auf den Betrieb von Mahlmühlen. Der Läufer ist auf der Welle des Wasserrads selbst befestigt. Der durch diese Räder geleistete Nutzeffekt beträgt ungefähr 33 Prozent der Wasserkraft.

Die **Fourneyron'sche Turbine** besteht aus einem beweglichen Theil B, dem eigentlichen Turbinenrad, das durch den sogenannten Bodenteller mit der Drehungsaxe C fest verbunden ist, und einem zweiten unbeweglichen Theil A, der die Leitschaufeln oder Leitkurven enthält und durch einen zweiten, zunächst über dem ersten stehenden Bodenteller mit einer Röhre verbunden ist, von welcher die bewegliche Axe wie





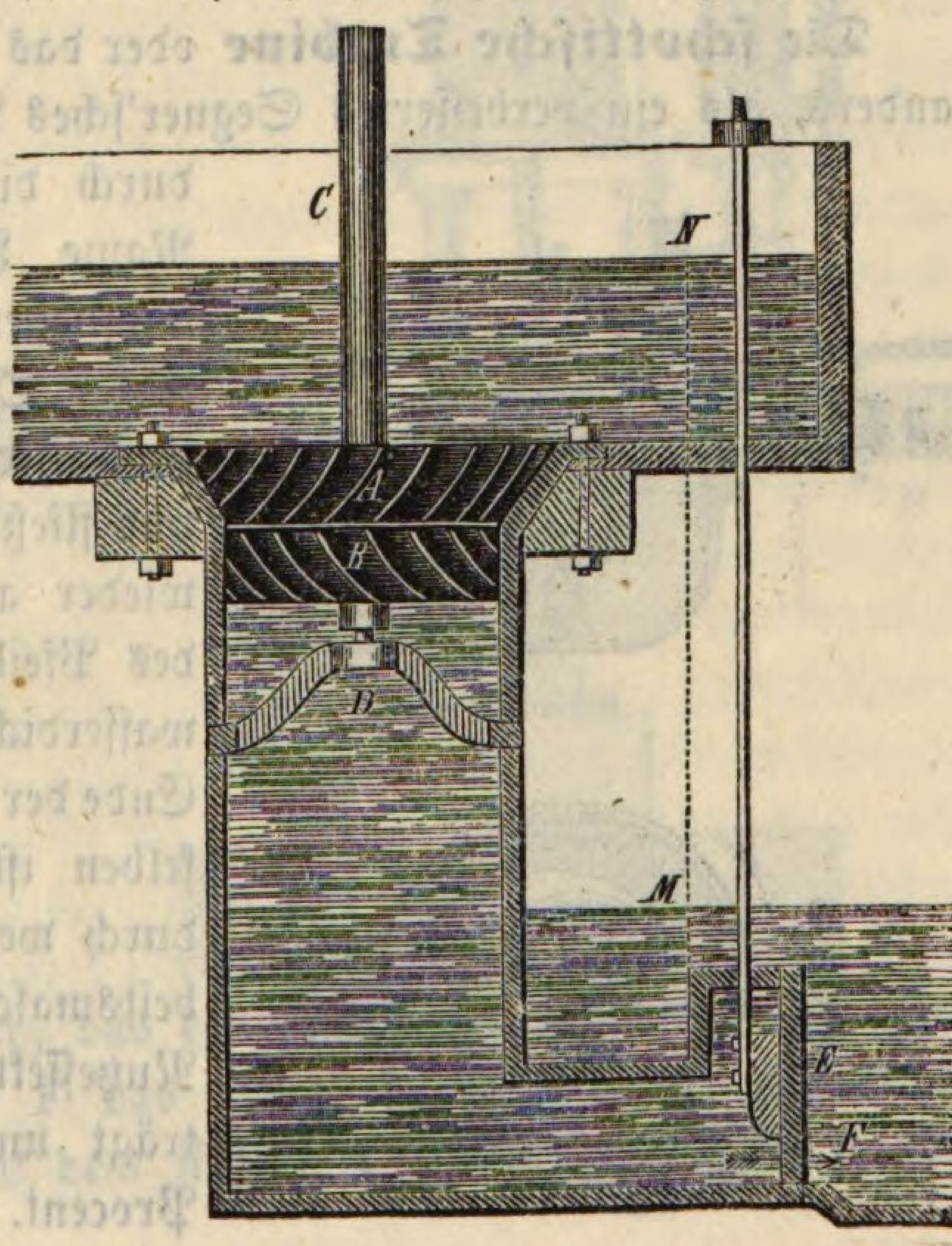
von einer Hülse umschlossen wird. Das von oben in den Behälter A eintretende Wasser kann nur durch die Oeffnungen, welche die Leitkurven zwischen sich lassen, austreten; bei seinem Austritt begegnet es mit einer seiner Druckhöhe entsprechenden Geschwindigkeit den **Schaufeln des Turbinenrads**, die eine den Leitkurven entgegengesetzte Krümmung haben und sich an den innern Radkranz unter einem solchen Winkel anschließen, daß das aus den Leitkurven austretende Wasser fast senkrecht auf sie trifft. Unter solchen Umständen sollte man meinen, daß das Wasser an den Schaufeln des Turbinenrads einen bedeutenden Stoß erleiden müsse, und es ist dies auch wirklich im Anfang der Bewegung der Fall; sobald aber das Rad den gehörigen Gang angenommen hat, so weichen die Radschaufeln mit einer Geschwindigkeit aus, die derjenigen Composante der Geschwindigkeit des Wasserstrahls gleich ist, welche senkrecht zu dem zuerst getroffenen Schaufelstück gerichtet ist, und welche allein einen Stoß verursachen könnte. Es ist also, als ob das Wasser nur mit der zweiten Composante seiner Geschwindigkeit, mit derjenigen nämlich, welche nach der Tangente des ersten Schaufelelements gerichtet ist, in die Schaufel einträte, und es kann daher kein Stoß erfolgen. Indem nun das Wasser längs der Schaufeln hingleitet, übt es einen unausgesetzten Druck auf dieselben aus und ertheilt dadurch dem Rad eine Drehung im Sinne des Pfeils. Zugleich verliert das Wasser aber auch allmälig seine Geschwindigkeit, indem es durch die Radschaufeln von Punkt zu Punkt weiter von seiner anfänglichen Richtung abgelenkt wird, bis es zuletzt, am äußeren Rand des Turbinenrads angekommen, eine der Drehungsrichtung entgegengesetzte Geschwindigkeit erhält, die unter Umständen gerade so groß werden kann, als die Geschwindigkeit des äußeren Radumfangs. Da das Wasser gleichwohl die Bewegung des Rades theilt, so ist die absolute Geschwindigkeit desselben,

mit der es das Rad verläßt, gleich Null, sobald der soeben erwähnte Fall eintritt. Das Wasser fällt alsdann senkrecht herab. Wir sehen hieraus, daß unter diesen Voraussetzungen diese Turbine den früher aufgestellten Anforderungen an ein gutes Wasserrad vollständig entspricht.

Die Schütze ist bei diesem Rad innerhalb des Behälters A angebracht; dieselbe besteht aus einem ringförmigen Stück D, das an Stangen mittelst Schrauben auf- und abwärts bewegt werden kann; je tiefer die Schütze steht, desto weniger Wasser kann aus den Leitkurven in das Rad fließen. Um auch hier jede plötzliche Ablenkung der Wasserfäden, d. h. jeden Stoß zu vermeiden, ist die Schütze sowohl am obern als am untern Theil abgerundet.

Die Fourneyron'schen Turbinen gehen ebenso gut unter dem Wasser als in der freien Luft; im ersten Fall wird der senkrechte Abstand der Oberfläche des Oberwassers von der des Unterwassers als Gefälle betrachtet, im zweiten Fall dagegen nur die Höhe des Niveau's des Oberwassers über der Mitte der Ausflußöffnungen am Turbinenrad. Sie sind bei großen wie bei kleinen Gefällen anwendbar; doch ist ihre Leistung bei kleinen Gefällen verhältnißmäßig etwas geringer als bei großen; im ersten Fall beträgt nämlich der Nutzeffekt 60 bis 65, im letztern 75 bis 80, unter besonders günstigen Umständen sogar 85 Procent der vorhandenen Wasserkraft.

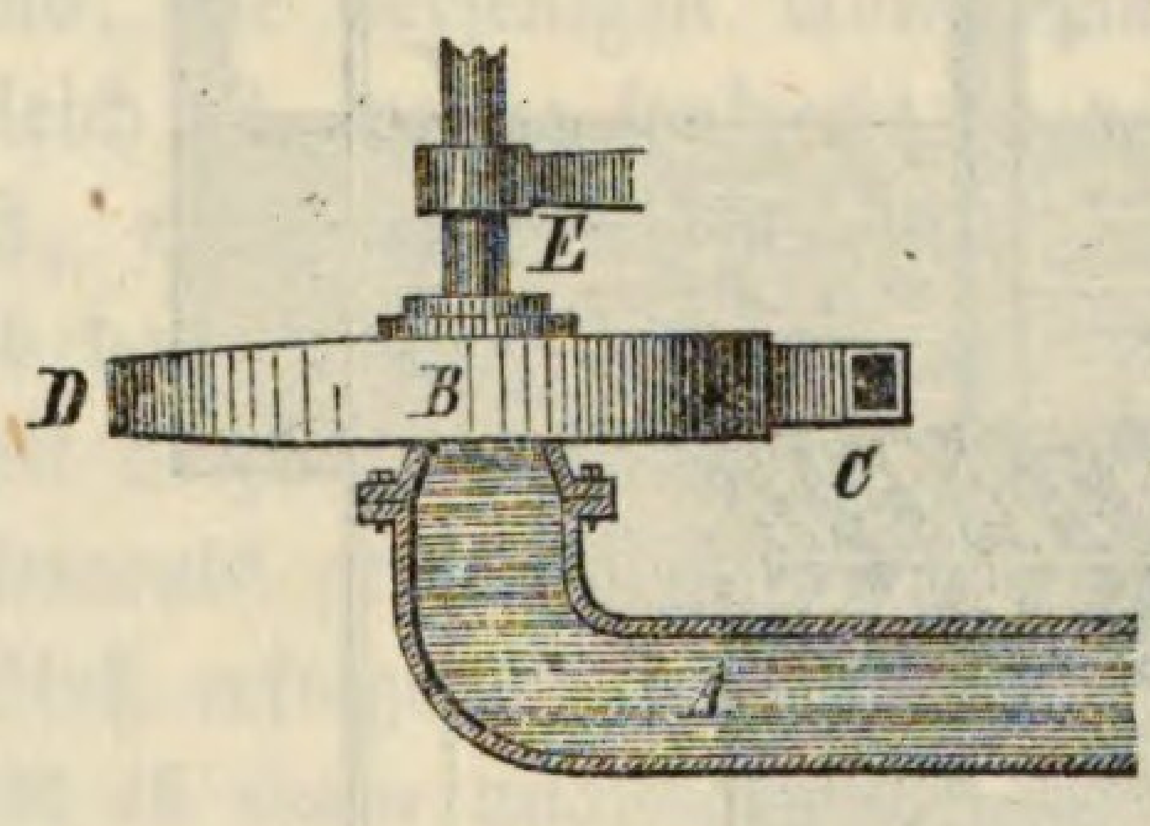
Die **Jonval'sche Turbine** besteht, wie die von Fourneyron, aus einem festen Rad A, das Leitkurven enthält, und einem beweglichen Rad B, dessen Schaufeln eine jenen entgegengesetzte Stellung haben. Das feste Rad hat eine konische, das eigentliche Turbinenrad, das unmittelbar unterhalb jenem angebracht ist, eine cylindrische Form. Die Schaufeln beider Räder haben eine ganz eigenthümlich gedrehte, windschiefe Gestalt, so daß das Wasser beim Durchfluß durch dieselben einen fast spiralförmig gewundenen Weg macht. Auch bei dieser Turbine sind die Schaufeln so gegeneinander gestellt, daß das Wasser, wenn die Maschine im gehörigen Gange ist, ohne Stoß aus dem Leitrad

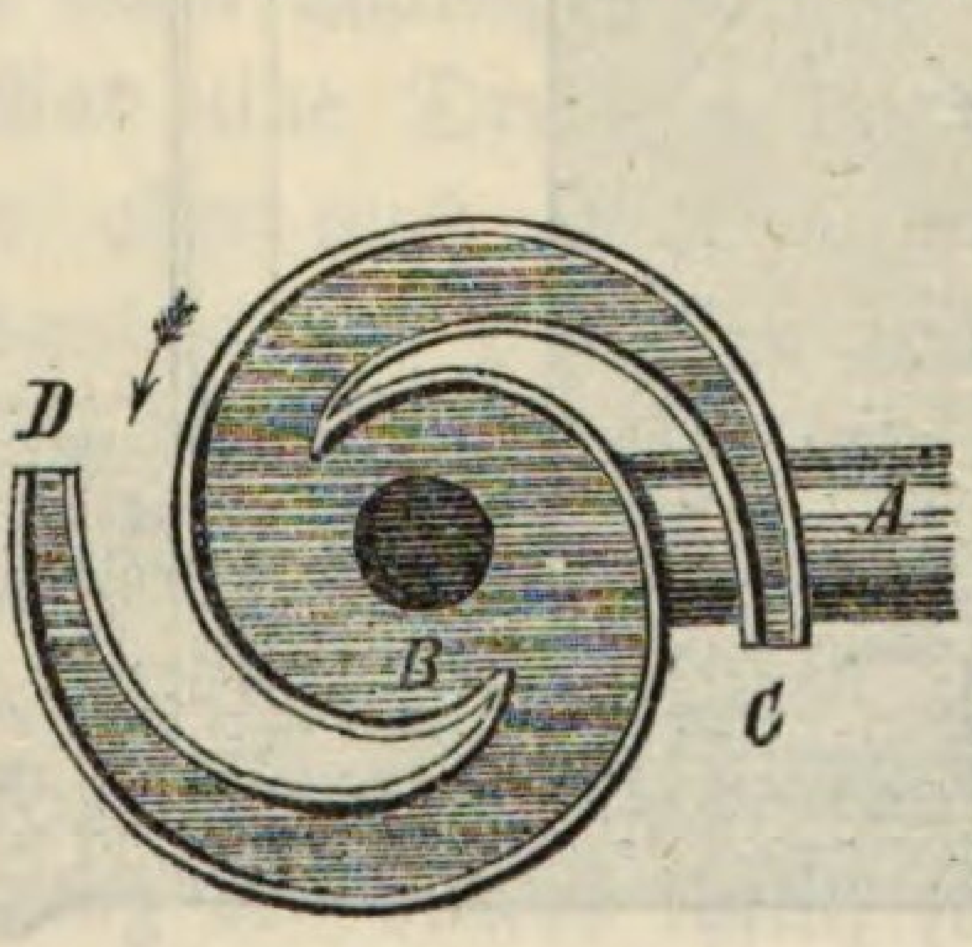


in das Turbinenrad eintritt. Die Drehungsaxe C, auf welcher das bewegliche Rad sitzt, ruht auf einem Träger D, der an den Wänden einer cylindrischen Röhre befestigt ist, welche das Turbinenrad genau umschließt, ohne jedoch seine Bewegung zu hemmen, und durch welche das Wasser nach unten abfließt. Bei F tritt das Wasser aus der Röhre aus in das freie Unterwasser; eine Schütze E regulirt seinen Ausfluß. Je größer der senkrechte Abstand des untern Wasserspiegels vom Turbinenrad ist, desto rascher fließt das Wasser unter dem Rad ab und desto schneller muß daher auch das Oberwasser durch die Turbine nachfließen. Dadurch entsteht ein Saugen, welches den Druck des Wassers auf die Radschaufeln ganz ebenso vermehrt, wie wenn die Druckhöhe über dem Turbinenrad entsprechend größer wäre. Es ist daher einerlei, in welcher Höhe zwischen Unter- und Oberwasser die Turbine eingesetzt wird. Je größer die Saughöhe ist, desto kleiner ist dagegen die Druckhöhe und umgekehrt; es ist somit das wirksame Gefälle immer gleich der Summe der Druckhöhe und der Saughöhe.

Dieser Umstand gibt der Jonval'schen Turbine den großen Vorzug vor den übrigen, daß sie sehr hoch gestellt werden kann, wodurch sie für Untersuchungen und Reparaturen ganz leicht zugänglich wird. Da sie überdies zum mindesten einen ebenso großen, ja bei geschickter Anordnung einen noch größern Nutzeffekt leistet, als die Forneyron'sche, so erklärt es sich leicht, daß sie diese, die lange vor ihr im Gebrauche stand, allmälig verdrängt.

Die **schottische Turbine** oder das Whitelaw'sche Rad ist nichts anders, als ein verbessertes Segner'sches Wasserrad (s. S. 26), und wird durch die Rückwirkung (daher auch der Name Reaktionsrad) des einseitig ausfließenden Wassers in Bewegung gesetzt. Das Wasser tritt aus der Zuflußröhre A von unten in das Rad ein und fließt durch die Mündungen C und D wieder aus, wodurch jenes im Sinne des Pfeils gedreht wird. Das Rad sitzt wasserdicht und zugleich beweglich auf dem Ende der Zuflußröhre, und oben auf demselben ist die Drehungsaxe E befestigt, durch welche die Bewegung auf die Arbeitsmaschine übergetragen wird. Der Nutzeffekt der schottischen Turbine beträgt unter günstigen Verhältnissen 6 Procent.

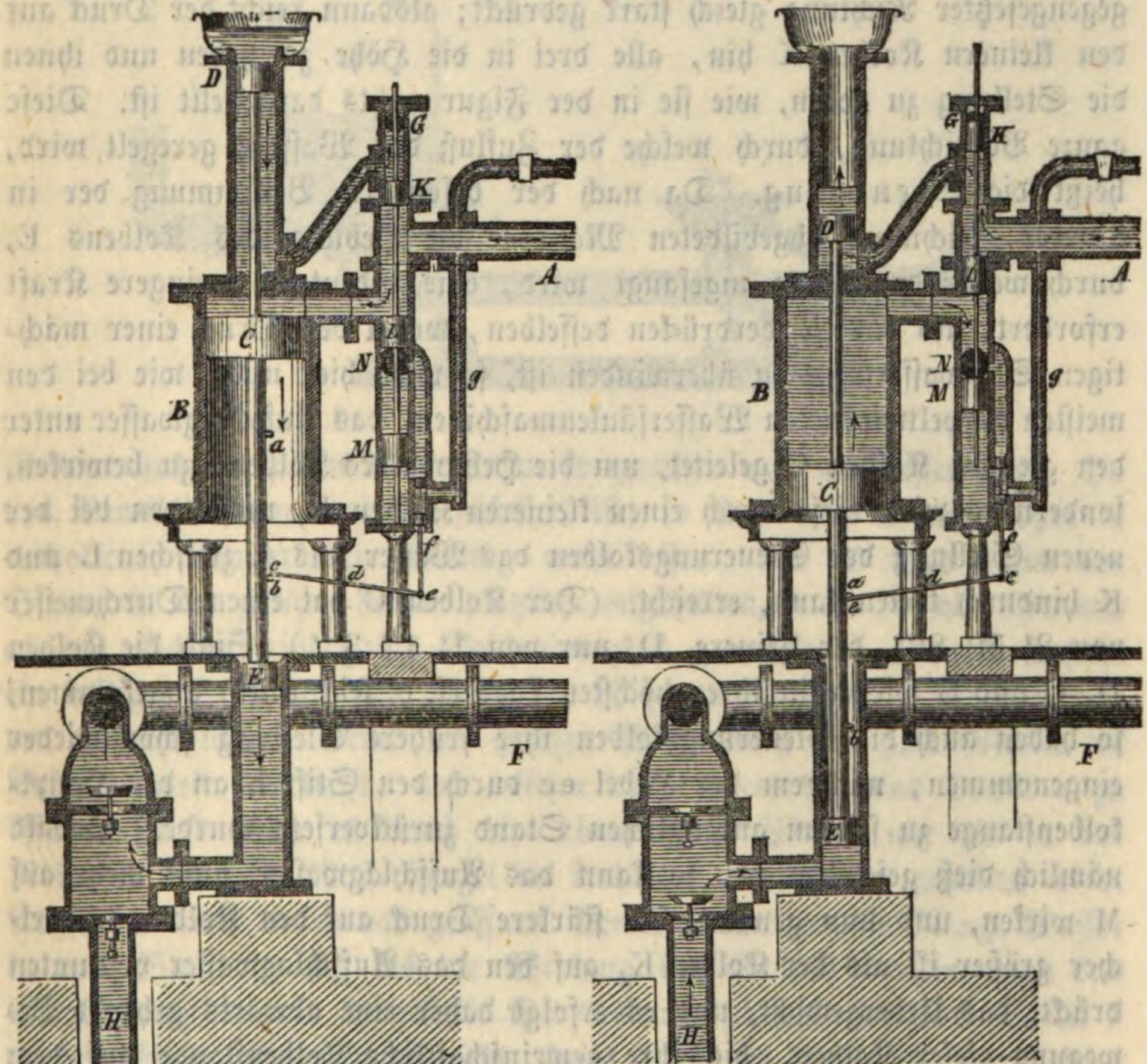




Die Wassersäulenmaschine.

Bei den Wassersäulenmaschinen wird das Wasser dazu benutzt, eine hin- und hergehende Bewegung hervorzubringen, indem man es auf Kolben wirken läßt, die sich in Cylindern bewegen. Man unterscheidet einfachwirkende, bei welchen das Wasser nur auf einer Seite des Kolbens Zutritt hat, und diesem daher nur eine Bewegung nach einer Richtung gibt, während die entgegengesetzte durch Gegengewichte bewirkt wird; und doppeltwirkende, bei denen das Wasser abwechslungsweise bald auf die eine, bald auf die andere Seite des Kolbens tritt und sowohl der Her- als der Hingang desselben durch den Wasserdruck bewirkt wird.

Unsere Zeichnnng stellt die doppeltwirkende Wassersäulenmaschine vor, welche die Bestimmung hat, die Salzsoole von Reichenhall über eine Höhe von 1260 Fuß nach Traunstein und Rosenheim zu schaffen. Der untere



Theil stellt ein Pumpwerk vor, das durch die Maschine in Gang gesetzt wird; H ist die Saugröhre, F das Steigrohr, und E der Kolben der Druckpumpe, der zugleich mit dem Kolben C und D der Wassersäulen-

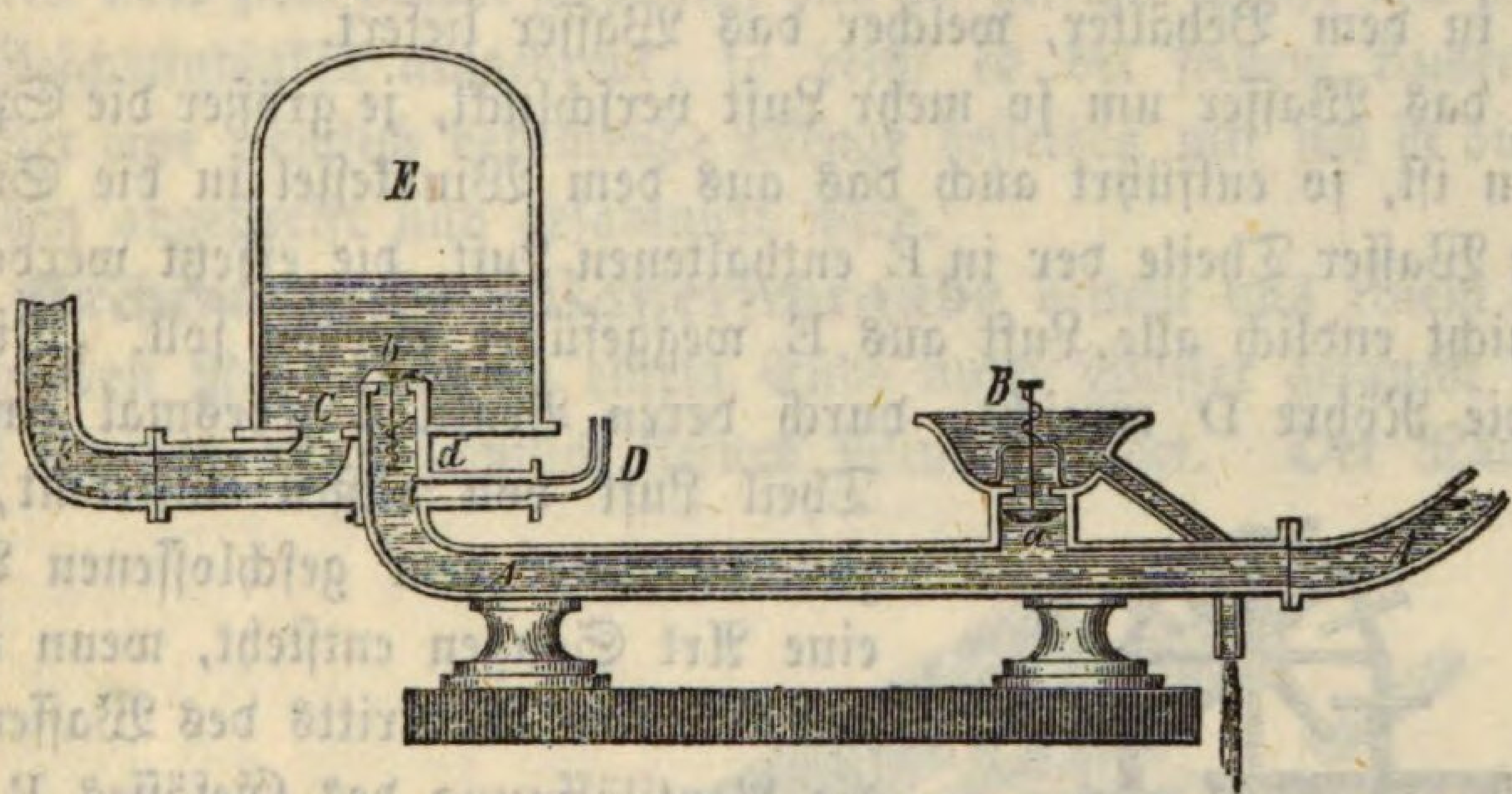
maschine, die in dem obern Theil der Zeichnung abgebildet ist, bewegt wird. Betrachten wir zunächst die Figur auf der linken Seite. Das Wasser fließt aus einem 387 Fuß hoch gelegenen Behälter durch die Röhre A herzu, tritt von oben in den Cylinder B und drückt den Kolben C, sammt den beiden andern mit ihm auf einer Stange sitzenden, D und E, nieder. Sobald C am Boden des Cylinders ankommt, wechseln die beiden kleinen Kölbchen, welche auf der Stange f befestigt sind, ihre Lage, indem der kleine Hebel ce, der seinen Umdrehungspunkt in d hat, durch den an der Hauptkolbenstange angebrachten Stift a bei c niedergedrückt und bei e gehoben wird. In Folge dessen nehmen auch die Kolben K, L und M eine veränderte Stellung ein, und das Ganze steht nun so, wie es die Figur rechts zeigt. Sobald nämlich dem Aufschlagwasser der Weg aus der Röhre g zwischen den kleinen Kölbchen hindurch in den Cylinder des Kolbens M geöffnet ist, so werden L und M in entgegengesetzter Richtung gleich stark gedrückt; alsdann reicht der Druck auf den kleinern Kolben K hin, alle drei in die Höhe zu heben und ihnen die Stellung zu geben, wie sie in der Figur rechts dargestellt ist. Diese ganze Vorrichtung, durch welche der Zufluß des Wassers geregelt wird, heißt die Steuerung. Da nach der besondern Bestimmung der in unserer Zeichnung abgebildeten Maschine die Hebung des Kolbens E, durch welche die Soole angesaugt wird, eine bedeutend geringere Kraft erfordert, als das Niederdrücken desselben, wobei der Druck einer mächtigen Salzwassersäule zu überwinden ist, so wird hier nicht, wie bei den meisten doppeltwirkenden Wassersäulenmaschinen, das Aufschlagwasser unter den gleichen Kolben C geleitet, um die Hebung des Kolbens zu bewirken, sondern es wird diese durch einen kleineren Kolben D, unter den bei der neuen Stellung der Steuerungskolben das Wasser aus A zwischen L und K hindurch treten kann, erreicht. (Der Kolben C hat einen Durchmesser von 2′ 5″ 8‴, der kleinere, D, nur von 1′ 1″ 3‴.) Sind die Kolben D, C und E wieder in ihrer höchsten Lage (s. d. Fig. links) angekommen, so haben auch die Steuerungskolben ihre frühere Stellung schon wieder eingenommen, nachdem der Hebel ec durch den Stift b an der Hauptkolbenstange zu seinem anfänglichen Stand zurückversetzt wurde. Sobald nämlich dieß geschehen ist, so kann das Aufschlagwasser nicht mehr auf M wirken, und nun gewinnt der stärkere Druck auf den Kolben L, welcher größer ist als der Kolben K, auf den das Aufschlagwasser von unten drückt, das Uebergewicht, und es erfolgt daher eine abwärts gehende Bewegung dieser Kolben, bis ihre gemeinschaftliche Kolbenstange auf dem Boden des Cylinders aufsteht. Das im Cylinder B enthaltene Wasser, welches beim Steigen des Kolbens C verdrängt wird, fließt durch die Oeffnung N ab, wohin sich auch das unter dem Kolben M befindliche

Wasser entleert, wenn dieser niedergedrückt wird; das unter dem Kolben D befindliche Wasser endlich fließt durch die Oeffnung G ab, wenn dieser niedergeht.

Maschinen, die zur Hebung des Wassers dienen.

Unter den vielen Vorrichtungen, welche erfunden worden sind, um Wasser in die Höhe zu heben, wählen wir hier einige der gebräuchlichsten oder interessantesten aus:

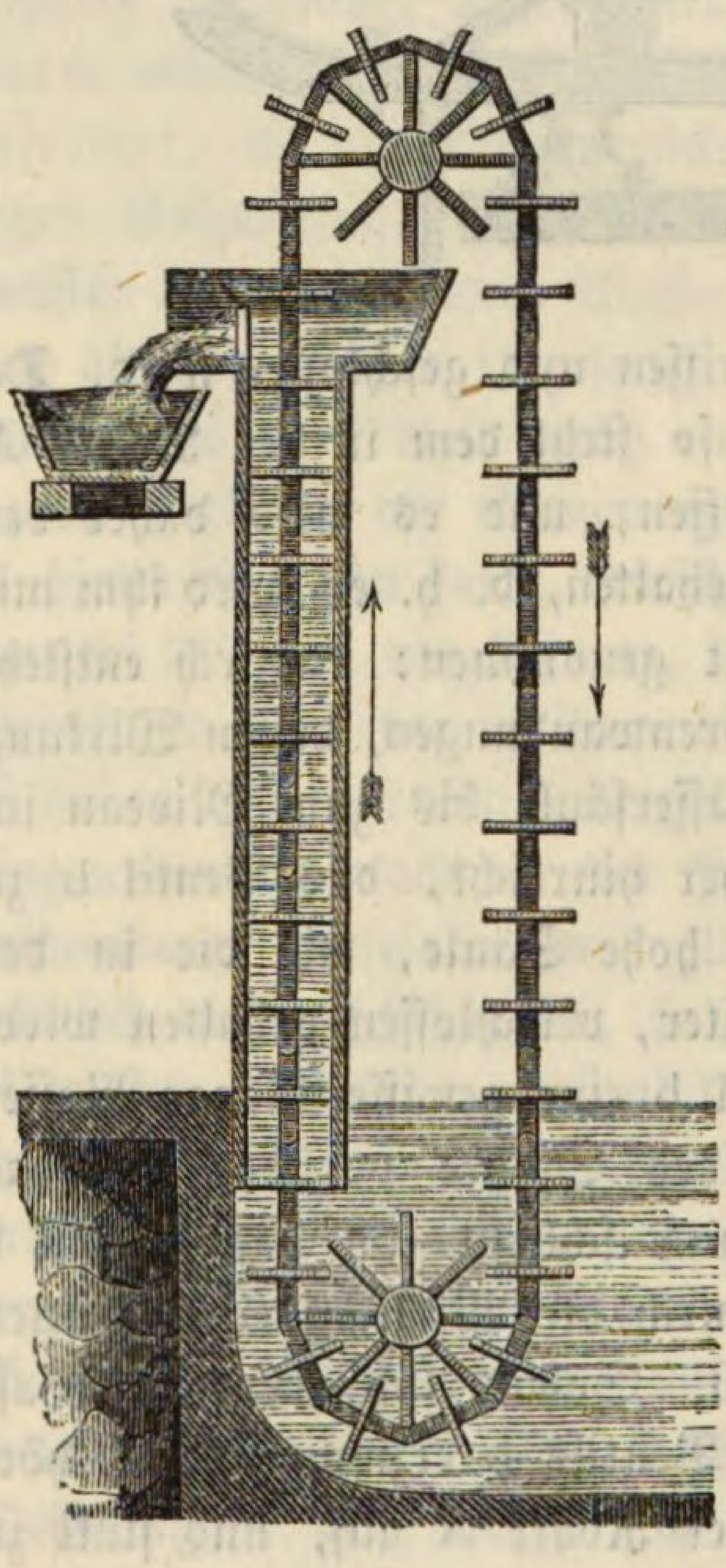
Der **Stoßheber** oder der **hydraulische Widder.** Aus einem hochgelegenen Behälter fließt Wasser durch die Röhre A herbei, und dringt in Folge des hydrodynamischen Drucks durch ein Seitenrohr theilweise in den Behälter B, aus dem es durch ein Seitenrohr wieder abfließt. Dieses Ausströmen des Wassers dauert aber nur ganz kurz, da das Ventil a des



Seitenrohrs durch den Wasserstrom fortgerissen und geschlossen wird. Da das Ventil b schon vorher geschlossen ist, so steht dem in der Röhre A enthaltenen Wasser kein Ausweg mehr offen, und es wird daher der Strom in der ganzen Röhre plötzlich aufgehalten, d. h. es wird ihm mit einem Schlag seine ganze Geschwindigkeit genommen: dadurch entsteht ein heftiger Stoß auf alle Theile der Röhrenwandungen, dessen Wirkung den hydrostatischen Druck der ganzen Wassersäule bis zum Niveau im Behälter weit übertrifft, und welcher daher hinreicht, das Ventil b zu öffnen, selbst wenn es durch eine ebenso hohe Säule, wie die in der Röhre A bis zum Wasserspiegel im Behälter, verschlossen gehalten wird. Es stürzt daher durch das geöffnete Ventil b eine gewisse Menge Wasser in den Windkessel E, bis die Wirkung des Stoßes vorüber und das Gleichgewicht wieder hergestellt ist; alsdann schließt sich das Ventil b wieder, theils durch sein Gewicht, theils durch die Wirkung einer kleinen Feder, die in der Zeichnung angegeben ist. Sobald sich aber das Wasser einen Ausweg durch die Oeffnung des Ventils b erzwungen hat, hört der stärkere Druck auf die Wandungen der Röhre A auf, und sinkt zu

dem anfänglichen hydrodynamischen Druck herab, so daß sich das Ventil a vermöge seines Gewichts, das ebenfalls durch eine Feder unterstützt ist, wieder öffnen kann. Schließt sich daher das Ventil b nach dem Stoß des Wassers wieder, so steht diesem auch bereits wieder ein Ausweg in das Gefäß B offen und es befindet sich also Alles wieder in dem Stand, von dem wir ausgegangen sind. Das Ventil a schließt sich aus derselben Ursache zum zweiten Mal, ein neuer Stoß erfolgt, und abermals wird eine Portion Wasser durch das geöffnete Ventil b in den Windkessel gestoßen. Dieses Spiel wiederholt sich fortwährend in sehr rascher Folge und in kurzer Zeit tritt eine beträchtliche Menge Wasser in den Windkessel, aus dem es durch die Spannkraft der zusammengepreßten Luft in E in der Steigröhre F zu einer Höhe gehoben wird, die nach dem oben Gesagten größer ist, als die der drückenden Wassersäule in dem Rohre A und in dem Behälter, welcher das Wasser liefert.

Da das Wasser um so mehr Luft verschluckt, je größer die Spannung derselben ist, so entführt auch das aus dem Windkessel in die Steigröhre tretende Wasser Theile der in E enthaltenen Luft, die ersetzt werden muß, wenn nicht endlich alle Luft aus E weggeführt werden soll. Dieß wird durch die Röhre D erreicht, durch deren Ventil d jedesmal ein kleiner Theil Luft von außen einströmt, so oft zunächst unter dem geschlossenen Ventil b eine Art Saugen entsteht, wenn in Folge des erneuten Austritts des Wassers durch die Ventilöffnung des Gefässes B das im vordern Theil der Röhre A, zunächst bei d, befindliche Wasser etwas zurückweicht. Die so durch d eindringende Luft wird durch den nächstfolgenden Wasserstoß in den Windkessel getrieben.



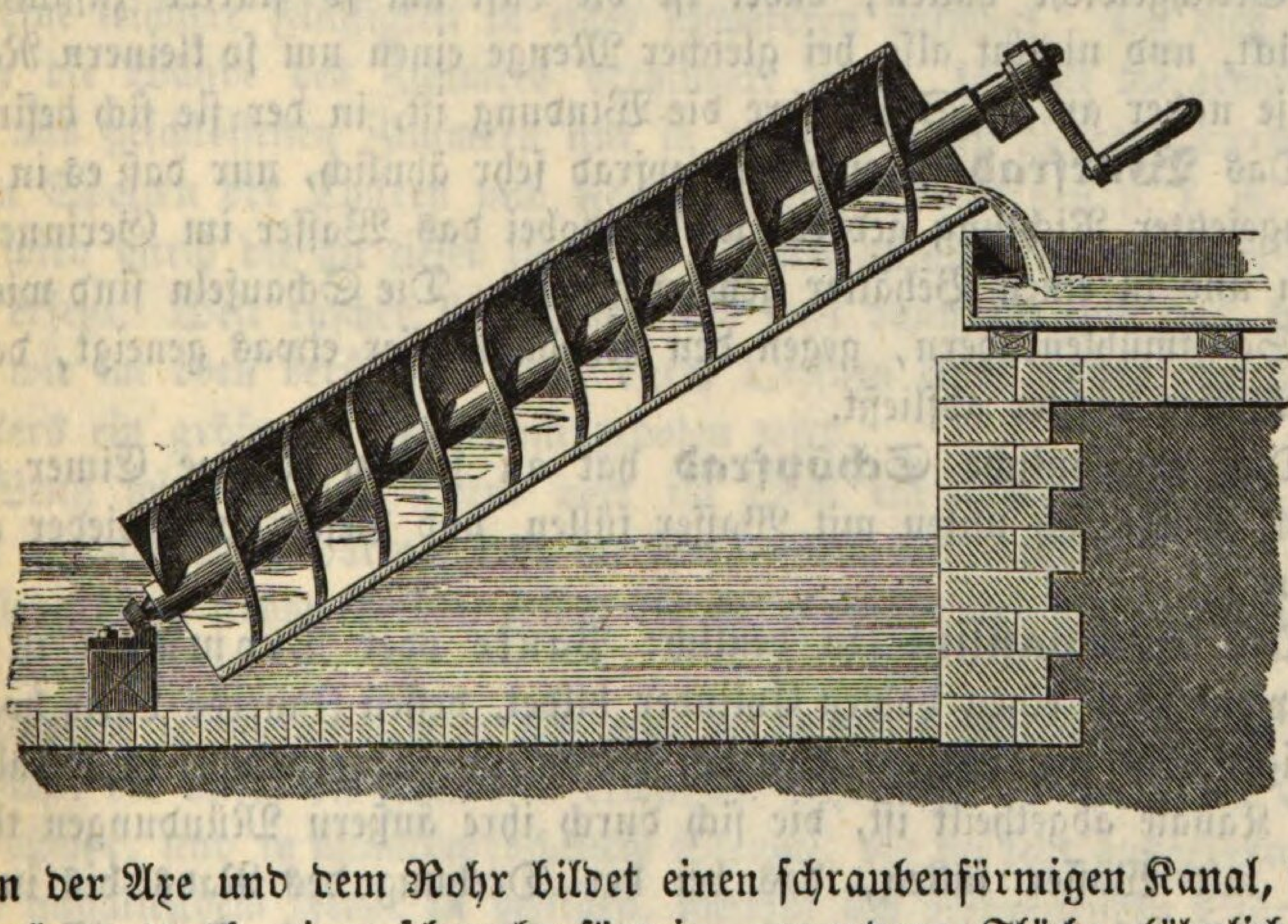
Diese sinnreiche Maschine wurde von Montgolfier, dem Erfinder des Luftballons, erfunden, und auch schon da und dort, namentlich in Frankreich, im Großen ausgeführt.

Das **Paternosterwerk** besteht aus einer Kette ohne Ende, welche um zwei Räder geschlungen ist, deren eines sich ungefähr in der Höhe befindet, bis zu welcher das Wasser gehoben werden soll, während das andere im Wasser untergetaucht ist. Wenn das obere Rad gedreht

wird, so dreht sich auch die Kette, und diese setzt ihrerseits wieder das untere Rad in Bewegung. Auf den einzelnen Kettengliedern sind in senkrechter Stellung zu denselben Scheiben befestigt, die durch eine Röhre laufen, welche sich so genau an dieselben anschließt, als dies möglich ist, ohne Reibung zu verursachen. Bewegt sich daher die Kette im Sinne der Pfeile, so steigen die Scheiben in der Röhre auf, indem zugleich jede eine gewisse Menge Wasser in der Röhre abschließt und mit sich in die Höhe nimmt; die Röhre endigt oben mit einer kleinen Erweiterung, aus der sich das Wasser in ein Gerinne oder in einen Behälter ergießt.

Die **Seilmaschine** beruht auf der Adhäsion des Wassers an Seilen. Wird nämlich ein Seil oder ein breites und dickes hänfenes Band ohne Ende, das unten in Wasser getaucht ist, wie die Kette des Paternosterwerks über zwei Räder gespannt, und in gleicher Weise wie jenes mit großer Geschwindigkeit umgedreht, so reißt es bei seinem Austritt aus dem Wasser eine ziemlich bedeutende Menge desselben mit sich in die Höhe, welche oben abgestreift und gesammelt wird.

Die **Archimedische Wasserschraube** besteht aus einem um eine Axe drehbaren Rohr, das an einem Ende unter Wasser getaucht ist, und mit dem Spiegel einen ziemlich kleinen Winkel bildet. Der Raum zwi-



schen der Axe und dem Rohr bildet einen schraubenförmigen Kanal, dessen Umgänge durch eine schraubenförmig gewundene Fläche (ähnlich der, welche eine straff angespanntes, die Stufen einer Wendeltreppe verdeckendes Tuch bilden würde) von einander getrennt sind. Bei jeder Drehung der Röhre tritt durch die untere Oeffnung des Kanals eine gewisse Menge Wasser ein, die bei fortgesetzter Drehung von Windung zu Windung emporsteigt, indem sie immer die tiefsten Stellen der einzelnen Windun-

gen erfüllt, und am obern Ende der Röhre in eine Wanne oder in ein Gerinne ausfließt.

Bei der sogenannten **holländischen Wasserschraube** ist die Röhre nicht beweglich, sondern besteht aus einem gemauerten hohlen Cylinder, dem Lutten, in welchem sich die auf der Drehungsaxe befestigte, an den Cylinder ziemlich genau anschließende Schraubenfläche dreht.

Die **Spiralpumpe** ist eine spiralförmig gewundene Röhre (ähnlich den Windungen eines Pfropfziehers), die auf einer horizontalen Welle befestigt ist. Das eine Ende derselben ist offen und ziemlich weit; das andere Ende besteht aus einem horizontalen Stück, das in der Drehungsaxe liegt, und unter luft- und wasserdichtem Verschluß mittelst einer Scheibe oder eines konischen Ansatzes so mit einer Steigröhre verbunden ist, daß zugleich eine Drehung der Spirale möglich ist. Bei jeder Drehung füllt sich der eine Theil des ersten Umgangs der Röhre mit Wasser, der andere mit Luft; daher enthält die ganze Röhre abwechselungsweise Wasser- und Luftsäulen, die immer weiter gegen die Steigröhre hingedrängt, und endlich in dieser bis zu einer beträchtlichen Höhe gehoben werden. Die Wassersäulen in den einzelnen Windungen müssen zusammen dem Gewicht der in der Steigröhre enthaltenen Wassersäule das Gleichgewicht halten; dabei ist die Luft um so stärker zusammengedrückt, und nimmt also bei gleicher Menge einen um so kleinern Raum ein, je näher an der Steigröhre die Windung ist, in der sie sich befindet.

Das **Wurfrad** ist einem Kropfrad sehr ähnlich, nur daß es in entgegengesetzter Richtung gedreht wird, wobei das Wasser im Gerinne gehoben und in einen Behälter geworfen wird. Die Schaufeln sind wie bei den Schiffmühlenrädern, gegen den Radhalbmesser etwas geneigt, damit das Wasser leichter abfließt.

Das gewöhnliche **Schöpfrad** hat an seinem Kranze Eimer oder Kübel, welche sich unten mit Wasser füllen, und dieses oben wieder ausgießen.

Das **Tympanum** (zu deutsch: Pauke oder Trommel) ist ein Schöpfrad, das einen hohlen Cylinder bildet, dessen Inneres durch bogenförmige, vom Umfang zur Axe sich verlaufende Querwände in spiralförmige Kanäle abgetheilt ist, die sich durch ihre äußern Mündungen theilweise mit Wasser füllen, das bei der Drehung des Rads bis in die Höhe der Axe gehoben wird, wo es alsdann durch Seitenöffnungen ausfließt.

Vierter Abschnitt:
Aerodynamik
oder
Lehre von der Bewegung luftförmiger Körper.

Bewegung der luftförmigen Körper im Allgemeinen.

Wenn wir die Thüre oder ein Fenster eines geheizten Zimmers ein wenig öffnen, so tritt, wie sich am besten durch ein in die Spalte gehaltenes Licht oder durch einen schmalen Streifen von feinem Papier zeigen läßt, am untern Theile der Oeffnung äußere Luft ein, während am obern Theil Luft aus dem Zimmer ausströmt. Die Ursache dieses doppelten Luftstromes liegt sehr nahe: die erwärmte Luft des Zimmers ist weniger dicht, also spezifisch leichter, als die äußere kalte Luft; sie würde daher in dieser aufsteigen, wenn sie ganz von ihr umgeben wäre, gerade wie eine leichtere Flüssigkeit in einer schwereren aufsteigt. Da dieß aber durch die Wände des Zimmers verhindert wird, so tritt die erwärmte Luft aus geschlossenen Zimmern nur in ganz geringen Mengen durch die feinen Spalten der Thüren und Fenster, durch Wandritzen u. s. w. aus und wird durch die an tiefer liegenden Stellen allmälig eindringende kalte Luft ersetzt. Weit rascher strömt aber die Luft dann ein und aus, wenn ihr, wie im oben berührten Fall, durch Oeffnen einer Thüre oder eines Fensters ein größerer Spielraum geboten wird.

Wenn wir auf dem Heerd oder im Ofen ein Feuer anmachen, so steigt alsbald die erwärmte Luft im Schornstein auf, und die kalte Luft der Umgebung strömt herbei, ersetzt die entweichende und führt dem Feuer neue Nahrung zu.

Dieselbe Erscheinung zeigt sich uns in größerem Maßstab bei Feuersbrünsten: die durch die Flammen erwärmte Luft steigt in mächtigen Wirbeln empor, und in ununterbrochenem Strome, der bei sehr ausgedehntem, lange anhaltendem Feuer zu heftigen, weithin sich verbreitenden Stürmen gesteigert werden kann, strömt von allen Seiten kalte Luft herzu, die zum Theil dazu dient, den großartigen Verbrennungsprozeß zu unterhalten, zum weit größeren Theile aber im aufsteigenden Strome erwärmt wieder weggeführt wird.

Kaum zu vergleichen sind aber diese Bewegungen der Luft mit jenen ungeheuern Luftströmen, welche in unaufhörlichem Kreislauf den ganzen

Erdball von den Polen bis zum Aequator, und von hier wieder zurück nach jenen, umfließen! Und doch haben auch diese mit jenen dieselbe Ursache gemein, nämlich die örtliche Erwärmung oder Verdünnung der Luft. Unter dem Aequator und zu beiden Seiten desselben, wo die Sonnenhitze ihren höchsten Grad erreicht, steigt die erwärmte Luft fortwährend senkrecht auf, kühlt sich in der Höhe immer mehr ab, und fließt auf beiden Seiten, in der Richtung gegen die Pole hin, ab, sobald sie vermöge ihrer größeren Dichtigkeit die sie umgebenden Schichten zu verdrängen vermag; dadurch entstehen die Aequatorialströmungen, welche, von beträchtlicher Höhe am Aequator gegen die Pole hin allmälig herabsinkend, die heiße Luft der Tropenzone wegführen und in die gemäßigten und kalten Erdstriche vertheilen. Die am Aequator aufsteigende Luft muß durch andere, von den Seiten herzuströmende, ersetzt werden; dadurch entstehen die Polarströmungen, welche, mehr an der Erdoberfläche hinstreichend, die kalte Luft der Polarländer der heißen Zone zuführen. Diese beiden großen Strömungen der atmosphärischen Luft sind zugleich die Hauptursache der Winde. Sie führen uns die aus den Meeren wärmerer Himmelsstriche in großer Menge aufsteigenden Wasserdämpfe zu, welche unser Land befruchten; sie mildern eben so wohl die erstarrende Kälte des hohen Nordens, wie die versengende Gluth der Tropensonne; durch sie werden die schädlichen Dünste, die in einzelnen Gegenden erzeugt werden und die Luft zum Athmen untauglich machen, fortgeführt, zerstreut und durch frische, gesunde Luft ersetzt.

Beim Blasen mit dem Mund oder mit dem Blasebalg wird die Luft dadurch in Bewegung gesetzt, daß man sie durch Zusammendrücken in einem abgesonderten Raum verdichtet und dann in die weniger dichte, freie Luft ausströmen läßt. Eine solche Verdichtung der Luft wird oft auch dadurch hervorgebracht, daß man sie durch einen rasch bewegten festen Körper, wie z. B. durch einen Fächer oder durch die Schaufeln eines Ventilators, fortstößt.

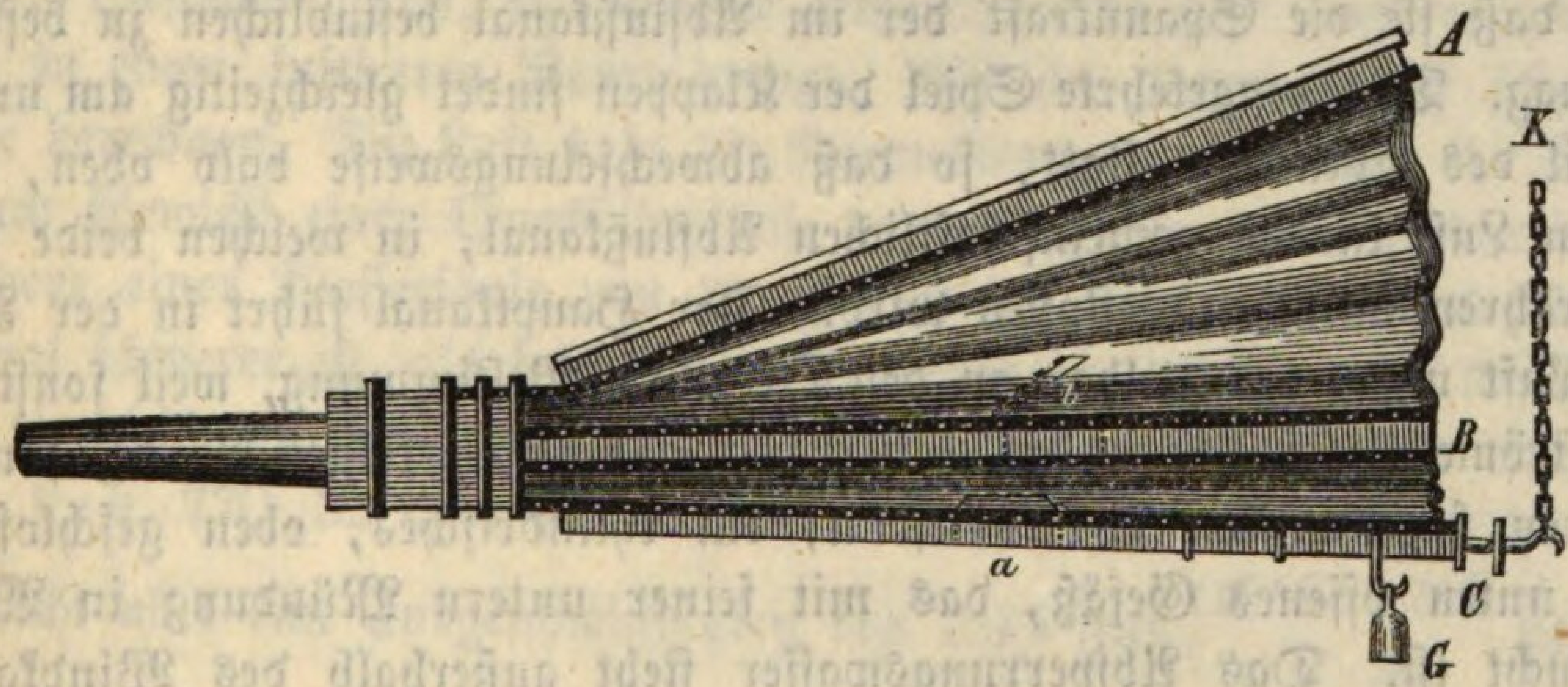
Aus allen diesen Betrachtungen geht hervor, daß eine Bewegung der Luft immer dann eintritt, wenn sie an verschiedenen Punkten ungleiche Dichte hat. Wird die Luft an einem Ort durch Erwärmen oder durch Saugen verdünnt, oder durch Zusammendrücken verdichtet: immer fließt die dichtere Luft, wofern ihr der Weg offen steht, in den mit weniger dichter Luft gefüllten Raum über.

Reihen wir hier die Beschreibung einiger Geräthe an, welche zur Hervorbringung eines Luftstroms dienen.

Der **Blasebalg.** Der einfache oder Handblasebalg, welchen man in Küchen und bei Zimmeröfen gebraucht, besteht aus zwei Brettstückchen, dem Boden und dem Deckel, die durch weiches Leder, das

sich in Falten legt, luftdicht mit einander verbunden sind. Er hat zwei Oeffnungen, nämlich ein kleines Loch im Boden, das mit einer nach innen sich öffnenden Klappe versehen ist, durch welche die Luft eindringt, und eine kurze, konische, offene Röhre, die sogenannte Düse, durch welche die Luft aus dem Balg ausströmt. Wird der Deckel aufgezogen, so wird der innere Raum des Blasebalgs vergrößert und die darin enthaltene Luft verdünnt; die äußere Luft dringt daher vermöge ihrer größeren Spannkraft durch die Klappe — bei einfachen Bälgen auch durch die Düse — ein und füllt den ganzen Raum aus; beim Niederdrücken des Deckels schließt sich die Klappe durch den größern Druck der innern Luft, und es wird daher diese durch die Düse ausgestoßen.

Beim zusammengesetzten Blasebalg, dessen sich die Schlosser und Schmiede bedienen, leidet der ausfließende Luftstrom keine Unterbrechung. Er besteht nämlich aus zwei Abtheilungen, welche durch eine feste Scheidewand B getrennt sind; der Deckel A und der Boden C sind beweglich. B und C haben Oeffnungen, die mit aufwärts sich öffnenden Klappen versehen sind. Sinkt der Boden C theils durch seine eigene Schwere, theils durch das ihm angehängte Gewicht G nieder, so strömt



die äußere Luft durch a in den untern Raum; wird sodann der Boden vermittelst der Kette K in die Höhe gezogen, so wird die Luft im untern Raum zusammengedrückt und durch die Oeffnung b in die obere Abtheilung gestoßen, wodurch sich diese mit Luft füllt. Der in der Regel durch Gewichte beschwerte Deckel A drückt indessen fortwährend auf die in dieser Abtheilung enthaltene Luft und stößt sie durch die Düse, die nur mit der obern Abtheilung in Verbindung steht, hinaus, selbst während neue Luft durch die Klappe b in den obern Raum einströmt. Sobald sich der untere Raum in den obern entleert hat, läßt man den Boden C wieder hinabsinken, um eine neue Menge Luft zu fassen, die durch eine abermalige Hebung des Bodens wieder in den obern Raum geschafft wird u. s. f.

Durch die Gebläse werden weit stärkere Luftströme als durch Blase-

bälge, erzeugt, so wie sie für größere Feuer, namentlich in Schmelzöfen, erforderlich sind.

Das **Cylindergebläse** besteht aus einem großen gußeisernen Cylinder, in welchem sich ein Kolben auf und ab bewegt. Die Zufluß- und Ausflußröhren der Luft mit ihren Klappen entsprechen ganz denen der doppelt wirkenden Druckpumpe, die wir im 2. Abschnitt dieses Buches (S. 76) beschrieben haben. Zwei ganz kurze, offene Zuflußröhren, von denen die eine am Deckel, die andere am Boden des Cylinders angebracht ist, sind mit Klappen versehen, die sich nach innen öffnen; die Klappen der Ausflußröhren, wovon ebenfalls die eine oben, die andere unten in den Cylinder mündet, öffnen sich nach außen. Wenn der Kolben niedergeht, so entsteht über demselben ein luftverdünnter Raum; die Klappe des obern Ausflußrohrs schließt sich durch den Druck der im Abzugskanal befindlichen Luft, die Klappe des Zuflußrohrs dagegen wird durch den Druck der Atmosphäre aufgestoßen, und der Cylinder füllt sich mit Luft. Hebt sich nun der Kolben wieder, so wird die Luft über demselben verdichtet, die Zuflußklappe schließt sich, während sich die des Abflußrohrs öffnet, sobald die Luft im Cylinder so stark zusammengedrückt ist, daß sie die Spannkraft der im Abflußkanal befindlichen zu besiegen vermag. Das umgekehrte Spiel der Klappen findet gleichzeitig am untern Theil des Cylinders statt, so daß abwechselungsweise bald oben, bald unten Luft in den gemeinschaftlichen Abflußkanal, in welchen beide Ausflußröhren münden, gestoßen wird. Der Hauptkanal führt in der Regel die Luft nicht unmittelbar an den Ort ihrer Bestimmung, weil sonst das Einströmen derselben in den Feuerraum stoßweise erfolgen würde, sondern in den sogenannten Windkasten, ein cylindrisches, oben geschlossenes und unten offenes Gefäß, das mit seiner untern Mündung in Wasser getaucht ist. Das Absperrungswasser steht außerhalb des Windkastens höher, als innen und übt daher einen beständigen Druck auf die darin enthaltene Luft aus, so daß diese in einem gleichmäßigen, ununterbrochenen Strom durch ein weiteres, in den Deckel des Windkastens mündendes Rohr in den Feuerraum getrieben wird. Der Windkasten muß im Verhältniß zum Cylinder sehr groß sein, damit die stoßweise in dieselbe eindringende Luft keine zu merklichen Unterschiede in der Dichte der im Windkasten befindlichen Luft und damit ein stoßweises Austreten derselben verursachen kann.

Der **Ventilator** ist ein hohler feststehender Cylinder, auf dessen horizontaler Axe Schaufeln befestigt sind. Die Luft tritt in der Nähe der Axe, wo der Cylinder offen ist, ein, und wird durch die sehr schnell sich drehenden Schaufeln im Kreise herumgetrieben. Durch die Centrifugalkraft entfernt sich die Luft von der Axe, häuft sich am Umfang des

Cylinders an und entweicht mit großer Geschwindigkeit durch das Ausflußrohr, das sich in tangentieller Richtung an den Umfang des Cylinders anschließt. Die Schaufeln sind entweder eben, wie man sie gewöhnlich bei den Putzmühlen sieht, die zur Reinigung des Getreides von Staub, Strohsplittern u. dergl. gebraucht werden; oder sie sind leicht rückwärts gekrümmt, was den Vortheil hat, daß sie die Luft leichter entweichen lassen.

Ausfluß der Gase aus Gefäßen.

Wenn Gas, das in einem geschlossenen Gefäß einem konstanten, d. h. unveränderlichen Druck ausgesetzt ist, durch eine Oeffnung in einen luftleeren Raum ausströmt, so erfolgt der Ausfluß ganz nach demselben Gesetz, wie bei Flüssigkeiten. Denken wir uns nämlich das Gas durch eine außerordentlich feine Flüssigkeit ersetzt, deren Dichte der des Gases an der Ausflußöffnung gleichkommt und deren oberes Niveau so hoch über der Ausflußöffnung steht, daß der Druck der Flüssigkeitssäule der Spannung des Gases bei seinem Ausfluß gleich ist, so ist die Geschwindigkeit, mit welcher nach dem früher aufgestellten Gesetz die Flüssigkeit ausströmt, auch die Ausflußgeschwindigkeit des Gases.

Die Geschwindigkeit, mit welcher atmosphärische Luft durch eine Oeffnung in einen luftleeren Raum dringt, läßt sich demnach auf folgende Weise berechnen. Die Luft habe die Normaltemperatur 0° und ihr Druck sei dem Gewicht einer Quecksilbersäule von 28 Zoll, oder, was einerlei ist, dem einer Wassersäule von 32 Fuß Höhe gleich. Da das Wasser 770mal schwerer ist, als solche Luft, so beträgt in diesem Fall die Höhe jener eingebildeten Flüssigkeitssäule das 770fache der entsprechenden Wassersäule, d. h. 770 . 32 oder 24640 Fuß. Einem Fallraum von 24640 Fuß entspricht aber eine Endgeschwindigkeit von 1215 Fuß $\left(\frac{1215 \cdot 1215}{2 \cdot 30}\right.$ nahezu $= 24640$; s. Buch II, S. 70), und dies ist daher auch die Ausflußgeschwindigkeit der Luft.

Mit der gleichen Geschwindigkeit fließt die Luft auch bei jedem andern größern oder kleinern Druck in den luftleeren Raum aus, vorausgesetzt, daß die oben angenommene Temperatur unverändert bleibt; denn mit dem Druck nimmt auch die Dichte der Luft zu oder ab, d. h. mit der bewegenden Kraft wird auch die zu bewegende Masse vermehrt oder vermindert. Ist z. B. der Druck der Luft nur halb so groß, als wir vorhin angenommen haben, so daß sie eine Wassersäule von nur 16 Fuß Höhe zu tragen vermag, so ist auch die Dichte derselben halb so groß, und beträgt daher nicht mehr den 770., sondern den 1540. Theil von der des Wassers; einer Wassersäule von 16 Fuß Höhe entspricht daher eine 16 . 1540 oder 24640 Fuß hohe Säule solcher Luft, und wir sehen daraus, daß auch

diese mit 1215 Fuß Geschwindigkeit in den luftleeren Raum überströmt. Zu dem gleichen Ergebniß kommen wir unter der obigen Voraussetzung, welches auch der Druck der Luft sein mag.

Hat die Luft eine andere, höhere oder niedrigere, Temperatur, so ist ihre Dichte bei der Spannung, vermöge welcher sie eine Wassersäule von 32 Fuß Höhe zu tragen vermag, nicht mehr der 770. Theil von der Dichte des Wassers, und es muß daher in diesem Fall die Zahl 770, mit welcher in obiger Rechnung die Zahl 32 multiplicirt worden ist, durch eine größere oder kleinere ersetzt werden, woraus sich auch eine andere Ausflußgeschwindigkeit, als die von 1215 Fuß, ergibt. Dasselbe gilt auch von den Gasen, die ein anderes spezifisches Gewicht haben, als die atmosphärische Luft. Kohlensäuregas z. B. hat ein spezifisches Gewicht von 1,52, d. h. es ist ungefähr $1\frac{1}{2}$ mal so schwer, als atmosphärische Luft. Bei einer Spannung, bei welcher es eine 32 Fuß hohe Säule Wasser zu tragen im Stande ist, beträgt daher seine Dichte nicht den 770., sondern den $\frac{2}{3}$. 770. oder 513. Theil von der Dichte des Wassers, und die Höhe der eingebildeten Flüssigkeitssäule deren Gewicht dem Druck gleich ist, den die ausströmende Kohlensäure ausübt, beträgt daher nur 513 . 32 = 16416 Fuß, woraus sich eine Ausflußgeschwindigkeit von 992 Fuß ergibt. Mit derselben Geschwindigkeit strömt aber aus denselben Gründen, die wir oben bei der atmosphärischen Luft angeführt haben, die Kohlensäure auch aus, wenn sie bei der gleichen Temperatur eine andere Spannung hat.

Aus diesem Beispiel sehen wir, daß spezifisch schwerere Gase eine geringere Ausflußgeschwindigkeit haben, als spezifisch leichtere; eine genaue Untersuchung des Verhältnisses zwischen der Dichte der Gase und ihrer Ausflußgeschwindigkeit zeigt, daß ein Gas, das 4, 9, 16 ꝛc. mal dichter ist, als ein anderes, mit einer 2, 3, 4 ꝛc. mal geringeren Geschwindigkeit in den luftleeren Raum ausströmt, als dieses, und umgekehrt; Wasserstoff z. B., dessen spezifisches Gewicht fast 16 mal geringer ist, als das der atmosphärischen Luft, strömt beinahe 4 mal so schnell aus, als diese.

Die Ergebnisse, die wir hier erhalten haben, fassen wir in folgenden zwei Sätzen zusammen:

Ein und dasselbe Gas strömt, welches auch seine Spannung sein mag, wenn seine Temperatur unverändert bleibt, mit konstanter Geschwindigkeit in den luftleeren Raum aus.

Die Quadrate der Geschwindigkeiten, mit welchen Gase von verschiedener Dichte bei gleicher Temperatur in den luftleeren Raum ausfließen, verhalten sich umgekehrt wie ihre Dichten.

Ist der Raum, in welchen ein Gas ausströmt, nicht luftleer, sondern

mit einem Gas von geringerer Spannung erfüllt, so ist die Sache wesentlich verändert. Einerseits ist die Ausflußgeschwindigkeit geringer, als sie bei dem vorhandenen Druck im Fall eines luftleeren Raums sein würde, weil ein Theil des Drucks des im Gefäß befindlichen Gases durch den äußern Druck aufgehoben und dadurch die bewegende Kraft vermindert wird. Anderseits ist die Ausflußgeschwindigkeit, wenn auch die Temperatur gleich bleibt, bei veränderlichem Druck nicht mehr kanstant, weil nun das Verhältniß der zu bewegenden Masse, die durch den Gesammtdruck bedingt ist, und der bewegenden Kraft, deren Größe von dem Unterschied der Drücke des innern und des äußern Gases abhängig ist, selbst auch veränderlich ist.

Um die Ausflußgeschwindigkeit des Gases in diesem Fall zu berechnen, bestimmen wir die Höhe einer Flüssigkeitssäule von der Dichte des ausströmenden Gases, deren Druck dem Unterschied der Spannungen der beiden Gase entspricht. Haben wir z. B. atmosphärische Luft, die unter einem Druck von 2 Atmosphären steht, vermöge dessen sie eine Wassersäule von 2 . 32 = 64 Fuß zu tragen im Stande ist, und es soll berechnet werden, mit welcher Geschwindigkeit dieselbe in atmosphärische Luft von gewöhnlicher Spannung — bei beiden die Temperatur 0° vorausgesetzt — ausströmt, so ist der Unterschied der Spannungen = 1 Atmosphärendruck, d. h. gleich dem Gewicht einer Wassersäule von 32 Fuß. Die Dichte der ausströmenden Luft ist aber doppelt so groß, als die der gewöhnlichen Luft, und es ist daher das Wasser nur 770/2 = 385 mal so schwer als jene. Für die Höhe der eingebildeten Flüssigkeitssäule erhalten wir daher 385 . 32 = 12320 Fuß, und für die Ausflußgeschwindigkeit derselben und daher auch für die der zusammengedrückten Luft 859 Fuß, während diese bei einem luftleeren Raum wie oben 1215 Fuß betragen würde.

Wird der Druck verdoppelt, so ist der Unterschied der Spannungen gleich einem 3fachen Atmosphärendruck, und die Dichte der ausströmenden Luft steigt auf das Vierfache. Die bewegende Kraft ist also jetzt 3mal so groß, als im ersten Fall, während die zu bewegende Masse sich verdoppelt hat; dadurch muß auch die Ausflußgeschwindigkeit eine andere werden, und wir erkennen hieraus, daß unter diesen Verhältnissen die Ausflußgeschwindigkeit nicht mehr konstant ist, wie beim Ausflnß in den luftleeren Raum.

Die Ausflußmenge ergibt sich auch hier aus der Größe der Oeffnung und der Ausflußgeschwindigkeit; es findet jedoch bei den Gasen wie bei den Flüssigkeiten eine Zusammenziehung des Strahls statt, so daß die wirkliche Ausflußmenge bei einer Oeffnung in einer dünnen Wand nur 0,65, bei einem kurzen cylindrischen Ansatz 0,93 und bei einem konischen Ansatz 0,95 der aus den oben angegebenen Bestimmungsstücken berechneten

beträgt. Neuere Untersuchungen haben gelehrt, daß diese Coeffizienten auch noch von der Druckhöhe in der Weise abhängig sind, daß sie mit der Zunahme der Druckhöhe zwischen gewissen Grenzen kleiner werden.

Wir haben S. 26 gesehen, daß beim Ausfluß der Flüssigkeiten ein einseitiger Druck auf die der Oeffnung gegenüberstehende Wand entsteht, welcher die Gefässe umzustürzen strebt, und auf welchem z. B. die Einrichtung des Segner'schen Wasserrades und der schottischen Turbine beruht. Ganz dasselbe findet beim Ausfluß der Gase statt: wenn das Pulver einer Kanone oder eines Schießgewehrs sich entzündet, so bildet sich fast augenblicklich eine große Menge Gas von sehr hoher Spannung, das sich, indem es die Kugel aus dem Lauf schleudert, den Ausgang durch die Mündung des Laufs erzwingt. In dem Augenblick aber, wo die Kugel den Lauf verläßt, und das Gas frei austreten kann, entsteht ein einseitiger Druck nach hinten, der die Kanone oft mehrere Schritte zurückwirft und sich dem Schützen, der ein Schießgewehr losfeuert, in einem zuweilen heftigen Stoß fühlbar macht; derselbe einseitige Druck macht, daß die Raketen mit so großer Geschwindigkeit emporschießen (der daran befestigte Stab, die Ruthe, dient ihnen als Steuerruder), er treibt die Feuerräder um, u. s. w.

Bewegung der Gase in Röhren.

Bei der Bewegung der Gase in Röhren beobachten wir dieselben Erscheinungen, wie bei Flüssigkeiten. Auch bei den Gasen erleidet die Bewegung eine Verzögerung in Folge des Reibungswiderstandes, der im geraden Verhältniß zu dem Quadrat der Geschwindigkeit, zu der Länge der Röhren und ihrem innern Umfang steht, und im umgekehrten zu dem Querschnitt derselben im Lichten. Da hiedurch ein Theil der bewegenden Kraft und somit des Drucks aufgezehrt wird, so nimmt dieser mit der Länge des Wegs ab, den das Gas in der Röhre zurücklegt.

Wenn man an der Mündung der Düse eines Blasebalgs eine trichterförmige Erweiterung aus Papier befestigt, so beobachtet man, daß der papierne Trichter jedesmal zusammengedrückt wird, wenn man die Luft heftig aus dem Blasebalg ausstößt. Die aus der engen Düse austretende Luft treibt nämlich die in dem trichterförmigen Ansatz enthaltene, vorher ruhige Luft weg, und breitet sich in diesem aus; dabei nimmt sie einen um so größern Raum ein, je größer der Querschnitt des Ansatzes wird, und diese Ausdehnung der ausströmenden Luft kann in einem Grad stattfinden, daß ihre Spannung geringer wird, als die der umgebenden Atmosphäre, in welchem Fall diese den Papiertrichter zusammendrückt.

Wenn man statt des konischen Ansatzes an der Mündung der Ausflußröhre eine flache Scheibe anbringt und ein leichtes Stück Kartenpapier

von derselben Form nahe davor hält, so wird dieses durch die ausströmende Luft anfangs ein wenig zurückgestoßen, dann aber wieder angezogen und in geringer Entfernung vor der Ausflußmündung in der Schwebe erhalten, so lange die Ausströmung des Gases fortdauert. Diese Erscheinung beruht auf der gleichen Ursache, wie die obige: indem sich nämlich die ausströmende Luft zwischen den beiden Scheiben ausbreitet, verdünnt sie sich nach dem Rand derselben hin immer mehr, und dies geht zuletzt so weit, daß die bewegliche Scheibe durch den größern äußern Luftdruck der festen Scheibe genähert wird.

Ganz ähnlich und sehr einfach ist folgender Versuch: man lege auf die eine Hand ein kleines Stück Papier, etwa von der Größe eines Thalers, halte die andere flache Hand nahe darüber und blase durch einen engen Spalt zwischen zwei Fingern stark darauf; alsdann wird das Papier in die Höhe gezogen und in der Schwebe erhalten, so lange das Blasen ununterbrochen anhält.

Stoß der bewegten Luft.

Der Stoß, den bewegte Luft auf einen in Ruhe befindlichen Körper ausübt, ist dem Widerstande gleich, den ruhige Luft einem in ihr bewegten Körper entgegenstellt, vorausgesetzt, daß die Geschwindigkeit des bewegten Theils in beiden Fällen gleich groß ist. Daher gelten für den Stoß der Luft dieselben Gesetze, welche wir für den Widerstand derselben (Buch II, S. 110 und 111) aufgestellt haben. Hiernach ist die Wirkung desselben der Dichte der bewegten Luft, dem Quadrat ihrer Geschwindigkeit und der Stoßfläche, d. h. dem auf der Richtung des Windes senkrecht stehenden Querschnitt des gestoßenen Körpers proportional. Uebrigens haben diese Gesetze keine allgemeine Gültigkeit; namentlich wächst die Wirkung des Stoßes bei größerer Geschwindigkeit des Windes stärker, als im Verhältniß des Quadrates; und auch in Betreff der Stoßfläche hat die Erfahrung bis jetzt höchstens annähernde Ergebnisse geliefert. Ist der gestoßene Körper selbst auch in Bewegung, so ist statt der Geschwindigkeit der Luft in dem Fall, daß beide Bewegungen nach derselben Richtung erfolgen, nur der Unterschied, und in dem Fall, daß sie entgegengesetzt sind, die Summe der Geschwindigkeiten in Rechnung zu ziehen.

Der Wind als Motor.

Die Anwendung des Windes als bewegende Kraft ist durch die Unregelmäßigkeit desselben in Stärke und Richtung außerordentlich beschränkt; denn in allen Fällen, wo die Natur der Arbeit keinen größern Spielraum im Gang der Maschine gestattet, kann er nicht zum Betrieb benutzt

werden. Die wichtigsten Anwendungen des Windes als Motor sehen wir in den Segelschiffen und in den Windmühlen.

Segelschiffe. Die Schiffssegel, große, drei- oder viereckige Stücke dichtgewobener Leinwand, die mittelst der Segelstangen oder Raaen an den Masten aufgehängt und ausgespannt sind, dienen dazu, den Stoß des Windes, der außerdem auch auf den aus dem Wasser hervorragenden Theil des Schiffsrumpfes wirkt, aufzufangen und dadurch das Schiff in Bewegung zu setzen. Die Zahl der Segel ist nach der Größe der Schiffe sehr verschieden; an großen Dreimastern gibt es deren 30 bis 40, wovon jedes seinen besondern Namen hat, und die an den drei Hauptmasten — dem Vorder- oder Fockmast, dem großen und dem Hinter- oder Besahnmast —, am Bugspriet, d. h. an dem über das Vordertheil oder den Bug des Schiffes hervorragenden Mast, und zwischen diesem und dem Vordermast vertheilt sind.

Bläst der Wind in der Richtung, welche das Schiff zu nehmen hat, so werden die Segel senkrecht zu dieser Richtung aufgestellt; in diesem Fall wirkt die volle Kraft des Windes, und überdies ist der geringste Widerstand des Wassers zu überwinden, da sich das Schiff in der Richtung seiner Länge bewegt und also dem zu verdrängenden Wasser den kleinsten Querschnitt darbietet. Wenn der Wiud von der Seite kommt, so braßt man die Segel, d. h. man gibt ihnen eine solche Stellung, daß sie vom Wind unter einem schiefen Winkel getroffen werden. In diesem Fall kommt nun ein Theil der Kraft des Windes, nämlich die auf der Richtung der Segel senkrecht stehende Composante desselben zur Wirkung, und von dieser wirkt wieder nur ein Theil auf Vorwärtsbewegung des Schiffes in der Richtung seiner Länge, während ein anderer Theil, der das Schiff seitswärts zu treiben strebt, von dem sehr beträchtlichen Widerstand des Wassers, der in dieser Richtung stattfindet, ganz oder doch großentheils aufgezehrt wird. Daher kommt es, daß das Schiff auch bei einem Seitenwind sich nahezu in der Richtung seiner Länge fortbewegt, wenn mittelst des Steuerruders eine Drehung desselben verhindert wird.

Durch geschickte Stellungen des Steuerruders und der Segel gelingt es sogar, ein Schiff gegen den Wind zu halten, d. h. es von einem entgegenstehenden Wind weder rückwärts noch zu weit seitwärts treiben zu lassen, sondern es dem Wind entgegenzuführen. Letzteres erreicht man durch das sogenannte Laviren, d. h. dadurch, daß man in einer Zickzacklinie bald auf die eine, bald auf die andere Seite steuert, während man jedesmal die Richtung des Windes unter einem Winkel kreuzt, der kleiner ist als 90°; in günstigen Fällen kann dieser Winkel bis auf 70°, ja selbst auf 60° vermindert werden.

Windmühlen. Der Stoß des Windes wird seit undenklichen Zeiten dazu benützt, Windräder in Bewegung zu setzen, durch die in der Regel Mahlmühlen, dann aber auch andere Maschinen, z. B. Pumpwerke, getrieben werden. Ihre Wirkung ist verhältnißmäßig sehr gering; dagegen haben sie den Vortheil großer Einfachheit und Wohlfeilheit. Die Windräder sind entweder horizontal oder, was gewöhnlicher der Fall ist, vertikal. Bei den horizontalen sind in der Regel 6 Flügel, viereckige Rahmen, die mit Leinwand überspannt sind, an einer vertikalen Welle mittelst Angeln so angebracht, daß sie durch den Wind auf der einen Seite aufgeklappt oder geöffnet, auf der andern Seite zurückgeschlagen oder geschlossen werden. Durch den Stoß, den der Wind auf die geöffneten Flügel ausübt, wird die senkrechte Welle umgedreht und durch diese die Maschine in Bewegung gesetzt. Diese Räder haben den Vortheil, daß sie nicht nach dem Wind gerichtet werden dürfen. Die horizontalen Windräder haben gewöhnlich vier große Flügel von nahezu rechteckiger Form. Die Breite dieser Flügel beträgt 5 bis 6 Fuß und ihre Länge ungefähr 30 Fuß, so daß das ganze Rad einen Durchmesser von 60 Fuß hat. Die Flügel bestehen aus dicken Stangen, die kreuzweise durch das Ende der Radwelle gesteckt sind; quer durch diese Stangen gehen Sprossen, die an ihren äußern Enden durch zwei mit der Hauptstange parallel laufenden Latten verbunden sind, so daß der ganze Flügel einer Doppelleiter ähnlich sieht. Ueber dieses hölzerne Gerüste wird ein Segeltuch gespannt, das den Wind auffängt; bei heftigem Wind wird das Segeltuch theilweise eingezogen, so daß es den Flügel nicht mehr ganz bedeckt, und der Wind durch den offenen Theil desselben fast frei hindurchgehen kann.

Die Radaxe wird so viel als möglich in die Richtung des Windes gestellt; es dürfen daher die Flügel nicht senkrecht zu derselben stehen, weil sonst der Wind wohl einen Druck nach der Länge der Radwelle, aber keine Drehung derselben hervorbringen würde. Aus diesem Grunde erhalten die Sprossen eine zur Axe schiefe Stellung, wie wir sie z. B. bei den Flügeln der kleinen Windrädchen sehen, die den Kindern als Spielzeug dienen; und zwar ist bei guter Einrichtung der Winkel, den sie mit ihr machen, um so kleiner, je näher sie bei derselben stehen, so daß der ganze Flügel eine windschiefe Fläche bildet. (Wer sich keine Vorstellung von einer solchen windschiefen Fläche machen kann, nehme ein rechteckiges, längliches Stück Pappe, fasse es an den beiden schmalen Enden an und gebe ihm mit der einen Hand eine kleine Drehung.) Der Winkel, den die äußersten Sprossen mit der Radwelle machen, soll ungefähr 80°, der der innern, der Welle zunächst stehenden 60° betragen. Wenn alle Sprossen dieselbe Stellung hätten und die Flügelfläche eine Ebene bildete, so wäre der

Stoß des Windes auf die innern Punkte derselben stärker als auf die von der Axe entfernteren Theile des Flügels, weil diese dem Winde mit größerer Geschwindigkeit ausweichen; an den äußersten Punkten könnte die bewegte Luft unter Umständen sogar ohne Stoß vorübergleiten, während doch gerade hier wegen des größern Hebelarms der Stoß die stärkste Wirkung hervorzubringen im Stande ist. Um daher zu bewirken, daß überall ein gleichmäßiger Stoß stattfinde, muß den einzelnen Theilen der Stoßfläche eine um so weniger schiefe Stellung gegen die Windrichtung gegeben werden, je weiter sie vom Drehungsmittelpunkt entfernt sind, weil sie alsdann in demselben Maße früher vom Wind getroffen werden, als die Geschwindigkeit größer ist, mit der sie demselben bei der Drehung ausweichen.

Da man beobachtet hat, daß der Wind selten eine ganz horizontale, sondern in der Regel eine etwas schief abwärts gehende Richtung hat, so wird auch die Radwelle nicht horizontal gelegt, sondern an dem Ende, wo die Flügel angebracht sind, unter einem Winkel von ungefähr 10° aufwärts gerichtet; zugleich erhält dadurch der ausweichende Wind mehr freien Raum. Um das Windrad stets in die Richtung des Windes stellen zu können, ist entweder die ganze Mühle oder nur das Dach sammt der Radwelle drehbar. Im ersten Fall ruht die Mühle mittelst einer senkrechten Axe und eines sogenannten Rollrings auf einem Gerüste, auf dem sie entweder von innen durch ein Stirnrad mit Getriebe, oder von außen durch einen langen Hebelarm, den sogenannten Sterz, der durch ein langes Seil mit einer Erdwinde verbunden ist, gedreht werden kann; im zweiten Fall sind am Dach Getriebe mit beweglichen Axen angebracht, welche in ein großes, auf dem obern Rande des übrigen Gebäudes befestigtes Stirnrad eingreifen; indem man die Getriebe mittelst Hebel umdreht, wird das Dach in Bewegung gesetzt. Die vertikale Welle, auf welche die Bewegung des Windrads durch konische Räder zunächst übergetragen wird, muß in diesem Fall genau im Mittelpunkt des Gebäudes stehen.

Der Dampf als bewegende Kraft.

Wer kennt heutzutage nicht die wunderbaren Wirkungen des Dampfes, wer hat sie nicht schon angestaunt oder wenigstens davon erzählen hören! — Hier eilt ein langer mit Menschen und Gütern beladener Wagenzug mit der Schnelligkeit des Vogels dahin; statt der Rosse ist ein feuerschnaubendes Ungethüm vorgespannt, das mit eisernem Zügel von einem einzigen Führer ruhig gelenkt wird. Eine dicke Wolke steigt aus schwarzem Krater auf: es ist der Dampf, der seine Rolle ausgespielt, seine bewegende Kraft abgegeben hat und nun matt und träge hinter dem Zuge

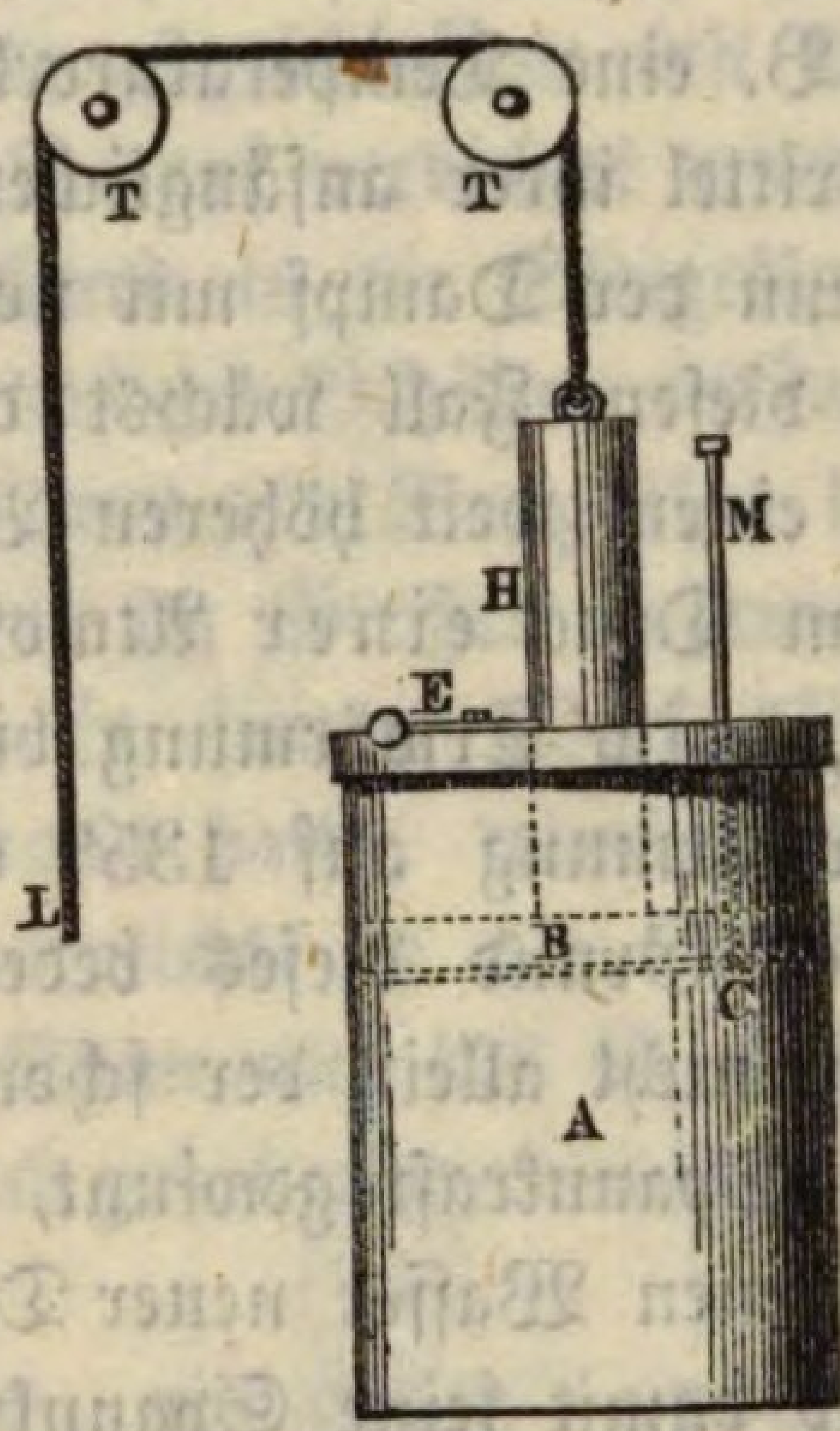
sich nachschleppt, bis er allmälig in der Luft aufgelöst oder vom Winde verjagt wird. — Dort schießt ein Schiff mitten durch die vom Ungewitter erregten Wogen schnurgerade dahin, ohne Ruder und ohne Segel; aus seinem Kamine qualmt Rauch und Dampf hervor, denn gleich einem gewaltigen Ruderer vermag der Dampf auch Sturm und Woge zu besiegen. — Tritt in diesen Maschinensaal: tausend Räder und Rädchen in emsigem Treiben und Schaffen, und doch nirgends ein bewegender Wasserstrom, keine Pferde am Göpel, kein Rad vom Winde gedreht! Aber siehe, dort steht der Riese, der das Ganze in Bewegung setzt: eine Dampfmaschine, die in streng gemessenem Takt geräuschlos auf- und niedergeht, und nach dem Willen ihres Wärters pünktlich ihre Arbeit verrichtet. — Hier wirbelt ein Mühlstein durch die Kraft des Dampfes, dort hebt sie den hundert Centner schweren Klotz eines Eisenhammers wohl sechzigmal in der Minute in die Höhe; hier zieht der Dampf Erz in schweren Lasten aus tiefem Schacht und dort preßt und walzt er hartes Metall wie weichen Thon!

Die Kraft des Dampfes ist erst am Ende des 17. Jahrhunderts in ihrem wahren Wesen erkannt worden, obgleich sie schon im Alterthum geahnt — Aristoteles und Seneka (350 v. Chr.) schrieben die Erdbeben der Wirkung des Dampfes zu, der sich im Innern der Erde oft plötzlich bilde —, und die Benutzung derselben zur Bewegung von Maschinen später zu verschiedenen Zeiten versucht worden war.

Anm. Hero von Alexandrien (120 v. Chr.) benutzte den Dampf, um eine Art Reaktionsrad in Bewegung zu setzen, indem er ihn durch die vertikale Drehungsaxe einer hohlen Kugel in diese einströmen, und wie das Wasser beim Segner'schen Wasserrad durch horizontale Arme aus einseitig angebrachten Oeffnungen wieder entweichen ließ. — Ein neapolitanischer Physiker, Namens Porta, der im Anfang des 17. Jahrhunderts lebte, suchte den Dampf zur Hebung des Wassers anzuwenden, indem er ihn auf die Oberfläche des in einem geschlossenen Behälter befindlichen Wassers leitete und durch den Druck desselben das Wasser in einer Röhre, die durch den Deckel des Behälters hindurch ging und fast auf den Boden desselben reichte, etwas über sein Niveau erhob und zum Ausfluß brachte. — Im Jahr 1615 erschien ein Werk, in welchem der Franzose Salomon de Caus eine Maschine beschreibt, bei welcher er ebenfalls den Druck des Dampfes zur Hebung des Wassers benutzte. Seine Vorrichtung unterscheidet sich von der vorhergehenden nur dadurch, daß der Dampf nicht in einem besondern Gefäß gebildet und dann erst in den Wasserbehälter geleitet wird, sondern daß dieser selbst zugleich Dampfkessel ist. Im Kleinen kann man sie nachbilden, indem man ein mit Wasser gefülltes Destillirglas (bei vorsichtigem Erwärmen gelingt es auch mit einem Arzneiglas, das einen dünnen Boden hat), mit einem Kork,

durch den eine bis an den Boden des Glases reichende Glasröhe gesteckt ist, verschließt, und dann das Glas bis zum Sieden des Wassers erhitzt; sobald der Dampf in Masse gebildet wird, treibt er das Wasser in einem hoch aufspringenden Strahl aus dem Glas. — Der Italiener Branka (1629) führt den Dampfstrom auf die Schaufeln eines Rades, und läßt ihn durch Stoß wirken. — Unter den hundert Erfindungen, die der Marquis von Worcester in einem 1663 erschienenen Buche veröffentlicht, findet sich auch eine, wo er den Dampf in ähnlicher Weise wie Salomon de Caus zur Hebung des Wassers benützt; bei dieser Gelegenheit spricht er von der gewaltigen Kraft des Dampfes, und bemerkt namentlich, daß der Dampf von einem Volumen Wasser hinreiche, um das vierzigfache Volumen Wasser auf eine Höhe von vierzig Fuß zu heben; im Ganzen aber verräth seine kurze und unklare Ausdrucksweise, daß er über die Sache selbst noch im Unklaren war. — In dem Werk, das der königlich großbritannische Maschinenmeister Samuel Morland im Jahr 1683 dem König Ludwig XIV. von Frankreich überschickte, heißt es unter Anderem: „Ein Volumen Wasser nimmt, wenn es in Dampf verwandelt wird, das 2000fache Volumen ein; der abgesperrte Dampf besitzt Kraft genug, um den Lauf einer Kanone zu sprengen; wenn er nach den Regeln der Mechanik wohl benützt und geleitet würde, so müßte er wie ein gutes Pferd ruhig seine Last tragen, und könnte für das Menschengeschlecht von großem Nutzen werden, namentlich zur Hebung des Wassers.“ Fast ist man versucht, auf diese Aeußerung hin zu glauben, Morland habe eine klare Einsicht in das Wesen und die mechanische Kraft des Dampfes gehabt; namentlich ist es auffallend, daß er das Verhältniß des Wasser-Volumens zu dem daraus gebildeten Dampf-Volumen ziemlich genau kannte — ein Kubikfuß Wasser gibt 1734 Kubikfuß Dampf von der Spannung einer Atmosphäre —; allein durch den Umstand, daß er bei diesen allgemeinen Bemerkungen stehen bleibt und nicht näher beschreibt, wie die Sache ausgeführt werden soll, verlieren seine Angaben bedeutend an Werth.

Der Franzose Dionysius Papin, Professor in Marburg, kündigte im Jahr 1690 eine Maschine an, bei welcher der Dampf in Verbindung mit der atmosphärischen Luft einem Kolben, der genau in einen hohlen Cylinder paßt, eine hin und her gehende Bewegung gibt. Die Einrichtung dieser Maschine ist folgende: Der Cylinder A ist oben offen, unten geschlossen; der Kolben B hat eine Durchbohrung C, die durch einen Stöpsel M geschlossen werden kann. Die Kolbenstange H ist mit einem Seil versehen, das über zwei feste Rollen geht, und an dem bei L eine Last angehängt werden kann. Die Kolbenstange hat in der Nähe des Kolbens einen Ausschnitt, in den ein Stück E paßt, mit dem der Kolben wie durch einen Sperrhacken am obern Ende des Cylinders festgehalten



werden kann. Soll die Maschine in Gang gesetzt werden, so wird eine kleine Menge Wasser in den Cylinder gegossen und dann erst der Kolben eingesetzt; indem man diesen niederdrückt, bis er die Oberfläche des Wassers berührt, entweicht die im Cylinder enthaltene Luft durch die Oeffnung C, die nachher wieder geschlossen wird. Bringt man nun Feuer unter den Cylinder, so verwandelt sich das Wasser in Dampf, dessen Spannkraft bei einer gewissen Temperatur hinreicht, den von oben stattfindenden Druck der Luft zu überwinden und den Kolben zu heben. Oben angekommen wird dieser durch den Sperrhacken E festgehalten, das Feuer unter dem Cylinder entfernt und die Last angehängt. Sobald das Feuer entfernt ist, erkaltet der Cylinder, was durch Abkühlung von außen mittelst kalten Wassers beschleunigt werden kann, und die Spannkraft des Dampfes sinkt rasch unter die der atmosphärischen Luft, so daß der Druck auf den Kolben von unten bald bedeutend kleiner ist (wie wenn die Luft unter demselben mittelst der Luftpumpe verdünnt worden wäre), als der Druck der Luft von oben. Wird daher der Sperrhacken ausgerückt, so drückt die Luft den Kolben abwärts und hebt zugleich die Last, wenn der Kolben eine entsprechende Größe hat. (Die Cylinder Papin's hatten mehrere Fuß im Durchmesser.) Durch wiederholtes Erwärmen und Abkühlen des Cylinders wird dasselbe Spiel beliebig fortgesetzt.

Bei der Maschine Papin's wird der Dampf auf dieselbe Art benutzt, wie er noch heute unsere Dampfmaschinen bewegt. Papin hat nämlich ganz richtig erkannt, daß der Dampf im Stande ist, einen starken Druck auf einen Kolben auszuüben, und daß dieser Druck durch Verdichtung des Dampfes schnell wieder aufgehoben oder wenigstens verschwindend klein gemacht werden kann. Wenn Papin ein ebenso geschickter praktischer Mechaniker gewesen wäre, als er ein tüchtiger Theoretiker war, so würde er den Ruhm, die erste im Großen brauchbare Dampfmaschine gebaut zu haben, wohl schwerlich einem andern überlassen haben. — Betrachten wir indessen das Verhalten des Dampfes gegen die Wärme noch etwas näher.

Wenn der Wasserdampf für sich abgeschlossen ist und der Grenze noch ferne steht, wo er seinen Aggregatzustand wechselt und sich zu tropfbar flüssigem Wasser verdichtet, so folgt er in Beziehung auf seine Ausdehnung und die Vermehrung seiner Spannkraft durch die Wärme ganz demselben Gesetze, wie permanente Gase. Nach diesem Gesetze nimmt

seine Spannkraft bei vermehrter Wärme nur langsam zu; es gehört z. B. eine Temperaturerhöhung von 100° dazu, um dieselbe nur um ein Drittel ihrer anfänglichen Größe zu vermehren. Anders verhält es sich, wenn der Dampf mit noch unverdampftem Wasser in Berührung bleibt; in diesem Fall wächst die Spannkraft desselben bei vermehrter Wärme in einem weit höheren Verhältniß, so daß z. B. Dampf von 100°, der dem Druck einer Atmosphäre das Gleichgewicht zu halten im Stande ist, durch Erwärmung bis zu 121° eine Spannung von zwei und durch Erwärmung auf 135° eine Spannung von drei Atmosphären erhält. Der Grund dieses bedeutenden Steigens des Dampfdrucks liegt darin, daß nicht allein der schon vorhandene Dampf durch die Wärmezunahme an Spannkraft gewinnt, sondern daß gleichzeitig aus dem im Gefäß enthaltenen Wasser neuer Dampf gebildet wird, wodurch die Dichte desselben und damit seine Spannkraft sehr bedeutend vergrößert wird. Umgekehrt sinkt diese aber auch eben so schnell, wenn die Temperatur abnimmt.

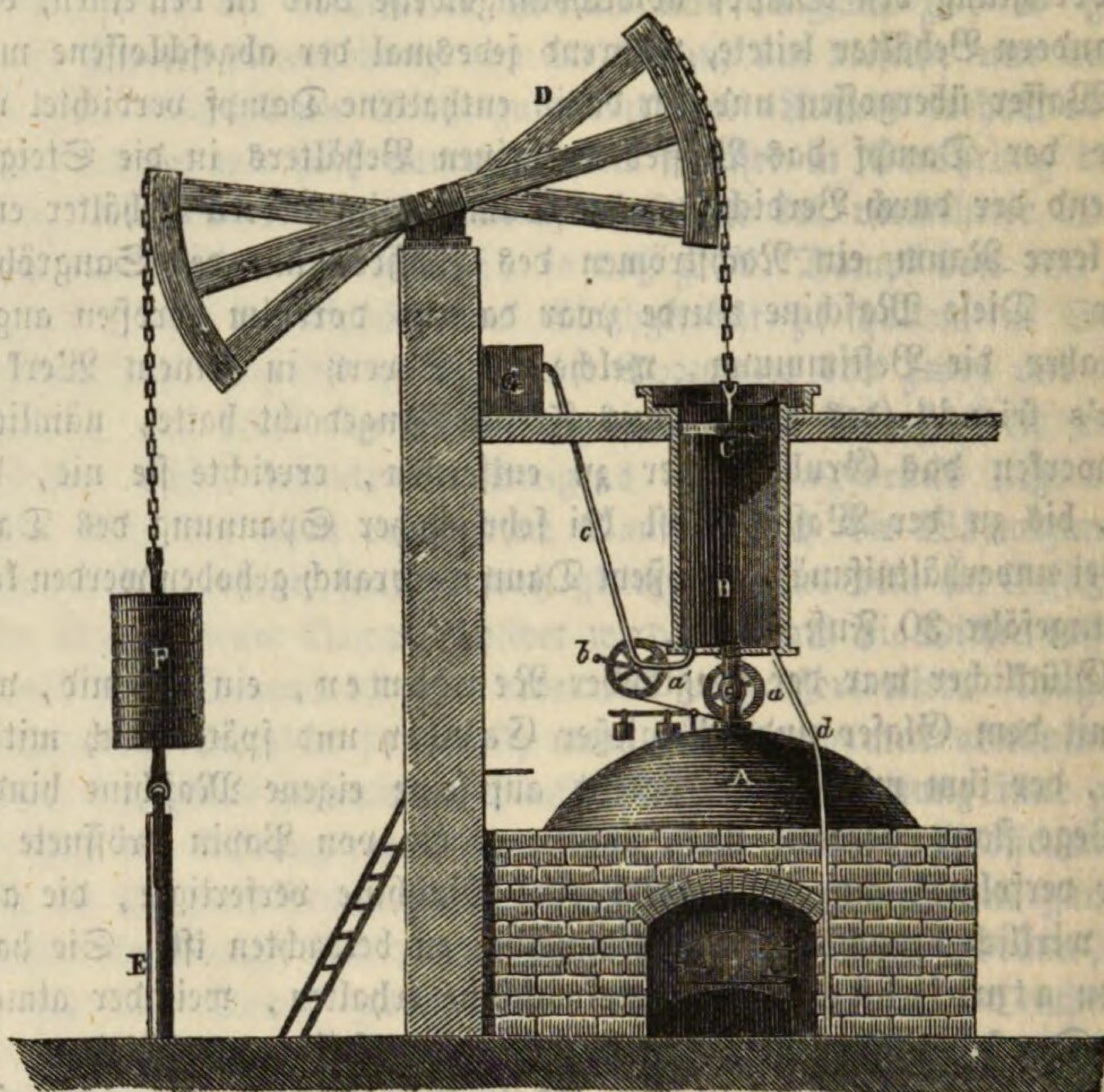
Wird bei einem bestimmten Punkt mit der Erwärmung inne gehalten, so hört die Bildung von neuem Dampf in einem geschlossenen Gefäß auf, da für jede Temperatur ein gegebener Raum nur eine ganz genau bestimmte Menge Dampf enthalten kann; man sagt alsdann, der Raum sey mit Dampf gesättigt. Nimmt hierauf die Temperatur wieder ab, so verdichtet sich ein Theil des Dampfes zu Wasser; der Raum ist zwar auch dann noch mit Dampf gesättigt, aber dieser hat eine der neuen Temperatur entsprechende, geringere Dichte und Spannkraft. Wird die Temperatur konstant erhalten, dagegen das Volumen vermindert, so wird auch eine gewisse Menge Dampf verdichtet, aber derjenige Dampf, mit dem der verminderte Raum gesättigt bleibt, behält seine anfängliche Dichte und Spannkraft. Wir sehen hieraus, daß, wenn der Dampf mit flüssigem Wasser in Berührung bleibt, seine Spannung einzig und allein von der Temperatur abhängt, und daß dieselbe namentlich durch Zusammendrücken des Dampfes auf einen kleineren Raum keine Veränderung erleidet.

Fast um dieselbe Zeit, da Papin mit seiner Maschine beschäftigt war, verfertigte der englische Hauptmann Savery (1698) eine Wasserhebmaschine, bei welcher er, wie Porta, Salomon de Caus und Worcester, den Wasserdampf auf die Oberfläche des zu hebenden Wassers drücken ließ, mit der Verbesserung jedoch, daß die Maschine als Saug- und Druckpumpe wirkte. Um dieses zu erreichen, wendete er zwei Wasserbehälter an, welche mit einer gemeinschaftlichen Saug- und Steigröhre in Verbindung standen, und von denen jeder an seiner Verbindungsröhre mit einer besondern Klappenvorrichtung (wie bei einer gewöhnlichen Saug- und Druckpumpe) versehen war; indem man alsdann mittelst einer Hah-

nenvorrichtung den Dampf abwechslungsweise bald in den einen, bald in den andern Behälter leitete, während jedesmal der abgeschlossene mit kaltem Wasser übergossen und der darin enthaltene Dampf verdichtet wurde, preßte der Dampf das Wasser des einen Behälters in die Steigröhre, während der durch Verdichtung des Dampfes im andern Behälter entstandene leere Raum ein Nachströmen des Wassers aus der Saugröhre bedingte. Diese Maschine wurde zwar da und dort im Großen angewendet, aber die Bestimmung, welche ihr Savery in seinem Werk „The miner's friend“ (des Bergmanns Freund) zugedacht hatte, nämlich aus Bergwerken das Grubenwasser zu entfernen, erreichte sie nie, da die Höhe, bis zu der Wasser selbst bei sehr hoher Spannung des Dampfes und bei unverhältnißmäßig großem Dampfverbrauch gehoben werden konnte, nur ungefähr 30 Fuß betrug.

Glücklicher war der Engländer Newcomen, ein Schmid, welcher sich mit dem Glaser und Bleigießer Cawley und später auch mit Savery, der ihm mit einem Patent auf seine eigene Maschine hinderlich im Wege stand, verband und, indem er die von Papin eröffnete Bahn weiter verfolgte, im Jahr 1705 eine Maschine verfertigte, die als die erste, wirklich brauchbare Dampfmaschine zu betrachten ist. Sie hat den Namen atmosphärische Dampfmaschine erhalten, weil der atmosphärische Druck den Hauptheil der Arbeit bei derselben verrichtet.

Unsere Abbildung stellt eine **Newcomen'sche** oder **atmosphärische Dampfmaschine** vor. A ist der mit einem Sicherheitsventil versehene Dampfkessel, aus dem der Dampf in den Cylinder B tritt und auf den Kolben C von unten drückt, während ihm von oben, wo der Cylinder offen ist, der atmosphärische Druck entgegenwirkt. Der Kolben ist durch eine Kette mit dem einen Arm des Balanciers D verbunden, an dessen anderen Arm die Kolbenstange E einer Wasserpumpe ebenfalls mittelst einer Kette befestigt ist. Der von unten auf den Kolben drückende Dampf hat nur die Aufgabe, dem von oben wirkenden Luftdruck das Gleichgewicht zu halten; sobald hier Gleichgewicht stattfindet, so wird die Kolbenstange E theils durch ihr eigenes Gewicht, theils durch die Belastung F abwärts gedrückt und der Kolben C nimmt seine höchste Stellung ein. Nun wird der Dampfzufluß aus dem Kessel mittelst eines Hahnens a unterbrochen, und gleichzeitig ein zweiter Hahnen a', der bis dahin die Röhre c verschlossen hielt, geöffnet, worauf sich aus dem Behälter G kaltes Wasser in den Cylinder B ergießt, welches macht, daß der größte Theil des in demselben enthaltenen Dampfes in Wasser verwandelt wird und die Spannkraft des zurückbleibenden fast auf Null herabsinkt. Dadurch gewinnt der Luftdruck das Uebergewicht, drückt den Kolben C abwärts und zieht zugleich die Kolbenstange E in die Höhe.



Je größer hier der Widerstand ist, desto größer muß die Druckfläche oder der Querschnitt des Kolbens sein. Das aus der Röhre c eingespritzte und das durch Verdichtung des Dampfes entstandene Wasser fließt in die Röhre d, aus der es von Zeit zu Zeit abgelassen wird. Indem man nun den Hahnen a wieder öffnet und dem Dampf den Eintritt in den Cylinder gestattet, während gleichzeitig der Hahnen a' geschlossen wird, veranlaßt man ein zweites Niedergehen der Kolbenstange E und eine zweite Hebung des Kolbens C u. s. f. Das Schließen des einen Hahnens und das gleichzeitige Oeffnen des andern wird durch Rädchen vermittelt, die daran befestigt und durch eine Schnur oder einen Riemen mit einander in Verbindung gesetzt sind.

Die Newcomen'schen Dampfmaschinen blieben lange im Gebrauch, ohne daß eine Veränderung von besonderer Wichtigkeit daran gemacht wurde. Die wichtigste Verbesserung erhielt dieselbe durch einen Knaben, Namens Humphrey Potter, der das Schließen und Oeffnen der Hahnen durch Drehen der Kurbel b zu besorgen hatte, und der, als er eines Tages seiner Arbeit auf einige Zeit entlaufen wollte, auf den glücklichen Einfall kam, die Kurbel mit einem Winkelhebel zu versehen und diesen durch Seile so an die Kolbenstange zu befestigen, daß das Schließen und

Oeffnen der Hahnen durch die Maschine selbst bewerkstelligt wurde; damit war der sinnreiche Junge der Erfinder der Steuerung geworden, die wir später in vollkommeneren Formen genauer kennen lernen werden. Erst um das Jahr 1796 trat der Engländer James Watt mit mehreren sehr wesentlichen Verbesserungen hervor, von denen wir einige der wichtigsten hier aufzählen wollen.

Einer der Hauptübelstände der Newcomen'schen Dampfmaschine war der, daß der Cylinder durch das Einspritzen von kaltem Wasser und durch den Eintritt der atmosphärischen Luft stets eine starke Abkühlung erleiden mußte; dadurch wurde die Wirkung des nachher eintretenden Dampfes sehr geschwächt und daher der Dampfverbrauch bedeutend erhöht. Watt bewerkstelligte die Verdichtung des Dampfes nicht im Cylinder selbst, sondern in einem abgesonderten Raum, dem Condensator, der mit dem Cylinder durch eine mit einem Hahnen versehene Röhre in Verbindung stand. Außerdem beseitigte er die Mitwirkung des Luftdrucks, indem er denselben durch die Dampfkraft ersetzte, zu welchem Zweck der Cylinder auch oben verschlossen wurde. Sobald der Kolben in seiner höchsten Stellung angekommen war, wurde der Dampf in den obern Theil des Cylinders zugelassen, während gleichzeitig dem unter dem Kolben befindlichen Dampf des Condensator geöffnet wurde, wo er mit dem in Form eines feinen Regens eingespritzten kalten Wasser in Berührung kam. Der Dampf trieb nun den Kolben unter gleichen übrigen Umständen abwärts, wie früher der atmosphärische Druck, und die Pumpenstange wurde in die Höhe gezogen. Nachdem der Kolben seine tiefste Stellung erreicht hatte, wurde sowohl der Condensator als die Dampfzuflußröhre abgeschlossen, dagegen die Verbindung zwischen dem obern und untern Theil des Cylinders hergestellt, so daß der Dampf von oben und von unten gleich stark auf den Kolben wirken konnte. Hiedurch entstand am Kolben Gleichgewicht und die Pumpenstange konnte daher durch ihr Gewicht niedergehen. Dieß war die wesentliche Einrichtung von Watt's **einfach wirkender Dampfmaschine.**

Der Gang dieser Maschinen war immerhin noch sehr unregelmäßig, so daß sie nicht wohl zu andern Zwecken als zum Heben des Wassers hätten benutzt werden können. Um sie zu allgemeinerem Gebrauch dienlich zu machen, suchte Watt auch die Hebung des Kolbens statt durch das Gewicht der Pumpenstange unmittelbar durch den Dampfdruck zu bewirken. Dieß gelang ihm dadurch, daß er den Dampf bald über, bald unter dem Kolben eintreten ließ, während gleichzeitig das eine Mal der untere, das andere Mal der obere Theil des Cylinders mit dem Condensator kommunizirte. Damit hatte Watt den letzten großen Schritt gethan, denn seine so eingerichtete **doppelt wirkende Dampfma-**

schine bildet bei allen Verbesserungen und Veränderungen, die seit jener Zeit daran angebracht wurden, und noch täglich angebracht werden, die Grundlage aller unserer Dampfmaschinen.

Wenn der Dampf während der ganzen Dauer eines Hubs auf den Kolben wirkt, so nimmt dieser eine stark beschleunigte Bewegung an und trifft die Böden des Cylinders mit einem Stoß, wodurch die Maschine mehr oder weniger heftige Erschütterungen erleidet. Watt kam nun auf den Gedanken, den Dampfzufluß zu unterbrechen, wann der Kolben erst einen Theil seines Wegs zurückgelegt hat; vermöge seiner bis dahin erlangten Geschwindigkeit und des Ausdehnungsbestrebens oder der Expansion des im Cylinder eingeschlossenen Dampfes legt alsdann der Kolben den Rest seines Wegs mit nahezu gleichförmiger, am Ende etwas verzögerter Geschwindigkeit zurück und kommt fast ohne Stoß in seinen äußersten Stellungen an. Diese Absperrung des Dampfes darf als eine der wichtigsten Erfindungen Watt's angesehen werden, und ist namentlich auch in ökonomischer Beziehung von Werth, weil dadurch der Dampfverbrauch um ein Bedeutendes vermindert wird.

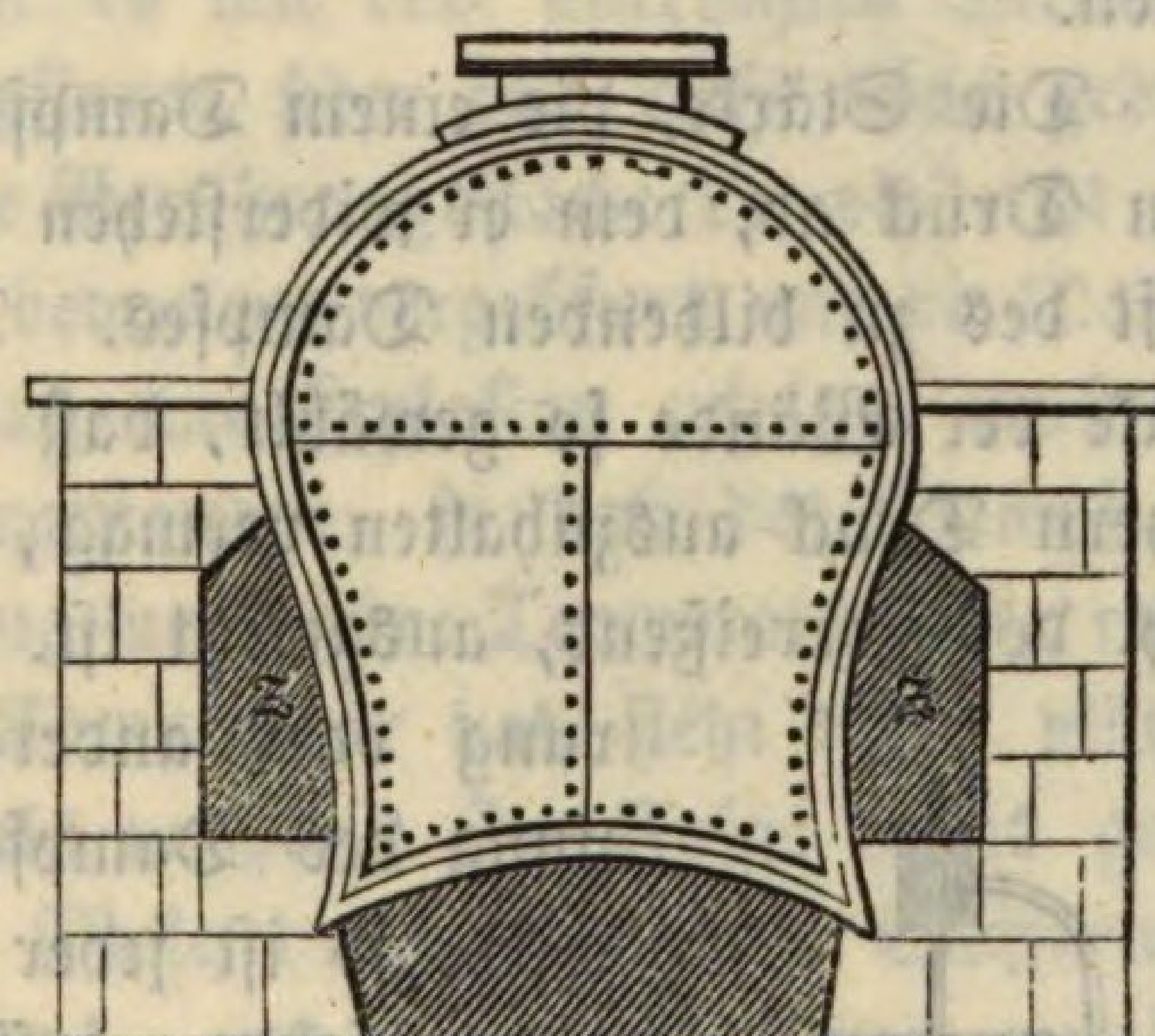
Unter den übrigen Erfindungen Watt's, die theils die Regulirung der Bewegung, theils die leichtere und sicherere Fortpflanzung derselben, theils verbesserte Kessel- und Ofeneinrichtung zum Zweck hatten, verdienen das Excentrikum und das nach ihm benannte Parallelogramm, die wir schon im 2. Buch unter den Organen der Bewegung kennen gelernt haben, besonders hervorgehoben zu werden.

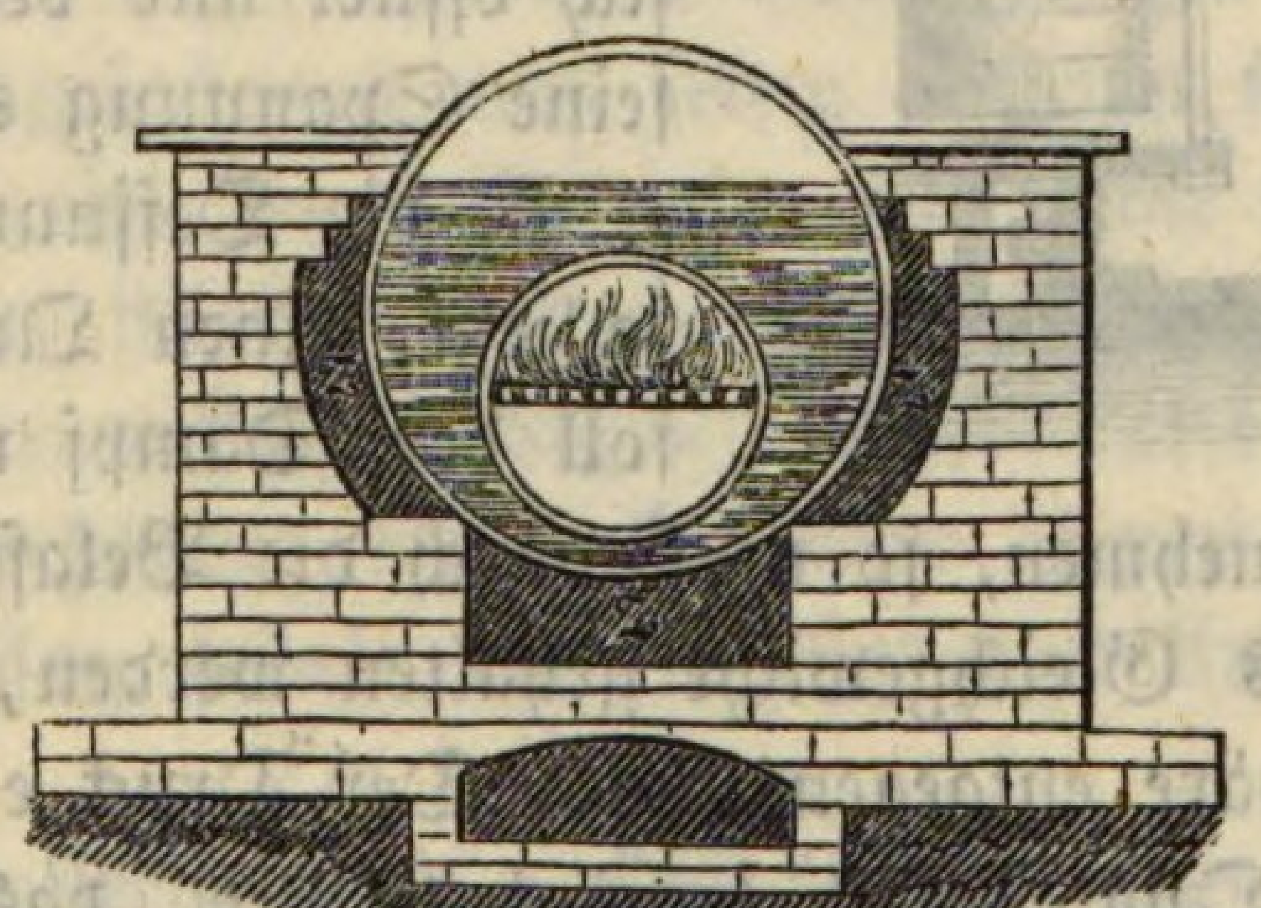
Ehe wir nun das vollständige Bild einer Watt'schen Dampfmaschine nach gegenwärtiger Einrichtung entwerfen, wollen wir zuvor einige Haupttheile derselben im Einzelnen näher kennen lernen.

Der **Dampfkessel.** Beim Bau eines Dampfkessels hat man dafür zu sorgen, daß bei gehöriger Feuerung in einer vorgeschriebenen Zeit die erforderliche Menge Dampf erzeugt und zugleich die größtmögliche Ersparniß an Brennmaterial erreicht wird. Zu diesem Zweck muß derselbe eine gewisse Heizfläche — so heißt die vom Feuer und von der heißen Luft bespülte Oberfläche des Kessels — haben, und die durch das Brennmaterial erzeugte Wärme muß so vollständig als möglich an denselben abgegeben werden. Diese beiden Forderungen erleiden jedoch in der Praxis zuweilen Beschränkungen. Bei Lokomotiven z. B. kann, obgleich eine sehr große Menge Dampf geliefert werden muß, die Heizfläche nicht beliebig vergrößert werden, und da überdieß die Dampferzeugung sehr schnell vor sich gehen muß, so bleibt keine andere Wahl, als die gegebene Heizfläche auf's Vortheilhafteste zu benützen, d. h. sehr stark zu feuern und einen Theil der Wärme ungenützt entweichen zu lassen. Da wo es nicht an Raum gebricht, und die Dampferzeugung nicht so

rasch vor sich gehen muß, kann die Heizfläche vergrößert und die heiße Luft so lange um den Kessel geführt werden, bis die Wärme möglich vollständig auf denselben übergegangen ist; diese Einrichtung wird besonders da getroffen werden, wo das Brennmaterial theuer ist. Unter gewöhnlichen Umständen rechnet man 10—15 Quadratfuß Heizfläche auf 1 Kubikfuß Wasser, der in einer Stunde in Dampf verwandelt werden soll, oder, was damit übereinstimmt, auf jede Pferdskraft der Maschine.

Die Dampfkessel werden gewöhnlich aus starkem Sturzblech oder auch aus Gußeisen verfertigt. Nach ihrer äußern Form sind sie entweder kofferähnlich mit konkavem Boden und konkaven Seitenwänden, oder cylindrisch; erstere heißen Kofferkessel, letztere Walzenkessel (beide Arten sind in den beigefügten Abbildungen leicht zu erkennen).



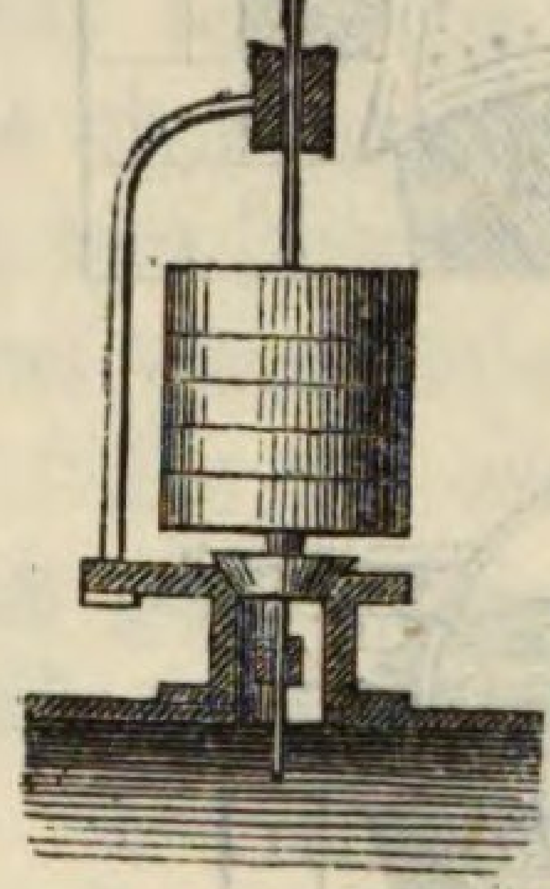


Die Kofferkessel haben äußere Heizung; der Feuerraum befindet sich an dem einen Ende unterhalb derselben und ist vom Gemäuer und vom Kesselboden gebildet; bei den Walzenkesseln dagegen wird nicht selten innere Heizung angebracht; alsdann befindet sich der Feuerraum am einen Ende einer weiten Röhre, die den Kessel der Länge nach durchzieht, so daß selbst die heiße Asche ihre Hitze an den Kessel und nicht an das Mauerwerk abgibt. Ehe die heiße Luft durch den Schornstein entweicht, wird sie entweder in äußeren Zügen (Z) mehrere Male um den Kessel herumgeführt, oder, was noch vortheilhafter ist, durch innere Züge, d. h. durch Röhren, die den Kessel der Länge nach durchziehen, hindurchgeleitet. Manchmal wird der Feuerraum vor dem einen Ende des Kessels angebracht; der Kessel hat alsdann mehrere innere Züge, durch welche die Flammen und die heiße Luft hindurchziehen; bei Lokomotiven beträgt die Zahl dieser Durchzugsröhren 100 und darüber, allein sie haben einen Durchmesser, der in der Regel nicht über 2 Zoll beträgt. Die heiße Luft durchzieht bei dieser Einrichtung den Kessel nur ein Mal und entweicht dann sogleich durch den Schornstein. Auf den Dampfschiffen sind die Kessel gewöhnlich mit zwei übereinanderstehenden Reihen enger, vertikaler Zellen versehen, zwi-

schen denen die erhitzte Luft hindurchgeht. Eine weitere Art sind die Dampfkessel mit Koch- oder Siedröhren; diese Kochröhren, gewöhnlich nur zwei, liegen unter dem Hauptcylinder und sind mit diesem durch kurze vertikale Röhren verbunden, durch die der in den Kochröhren gebildete Dampf in die Hauptröhre gelangt. Diese Einrichtung gewährt neben einer großen Feuerfläche den Vortheil, daß der Hauptkessel der Flamme nicht so stark ausgesetzt ist und daher geschont wird.

Um zu verhüten, daß der Dampfkessel Wärme durch Ausstrahlung verliere, umgibt man ihn mit schlechten Wärmeleitern, wie Sägespähnen, Werg, Wolle, Kuhhaaren u. dergl.; zuweilen wird er auch mit einer Holzverkleidung, wie dieß namentlich bei Lokomotiven der Fall ist, umgeben.

Die Stärke, die einem Dampfkessel gegeben werden muß, hängt von dem Druck ab, dem er widerstehen soll, d. h. von der Größe der Spannkraft des zu bildenden Dampfes. Der Vorsicht halber wird jedoch die Dicke der Wände so gewählt, daß der Kessel auch noch einen beträchtlich höhern Druck auszuhalten vermag, ehe er der Gefahr der Explosion, d. h. des Zerreißens, ausgesetzt ist. Da indessen durch unvorsichtige Feuerung oder andere unvorhergesehene Zufälle die Spannung des Dampfes zuweilen dennoch zu hoch gesteigert wird, so ist jeder Kessel mit einem Sicherheitsventil versehen, dessen Belastung so bemessen ist, daß es sich öffnet und dem Dampf den Austritt gestattet, wenn seine Spannung eine gewisse Grenze überschreitet. Hat z. B. die Oeffnung, welche das Sicherheitsventil verschließt, einen Querschnitt von 10 Quadratzoll, und soll der Dampf nicht über 3 Atmosphären Spannung annehmen, so muß durch die Belastung dem Druck von 2 Atmosphären das Gleichgewicht gehalten werden, da der Luftdruck der dritten Atmosphäre entgegenwirkt. Der Druck einer Atmosphäre auf eine Fläche von 1 Quadratzoll beträgt 15 Pfd., das Gewicht des Sicherheitsventils sammt Belastung muß also 2 . 15 . 10 = 300 Pfd. betragen. Gewöhnlich ist das Sicherheitsventil mit einem Hebelarm versehen und das angehängte Gewicht alsdann verhältnißmäßig kleiner. Bei den Federventilen wird statt des Gewichts die Spannung einer Spiralfeder benutzt, um das Ventil mittelst eines Hebelarms verschlossen zu halten.



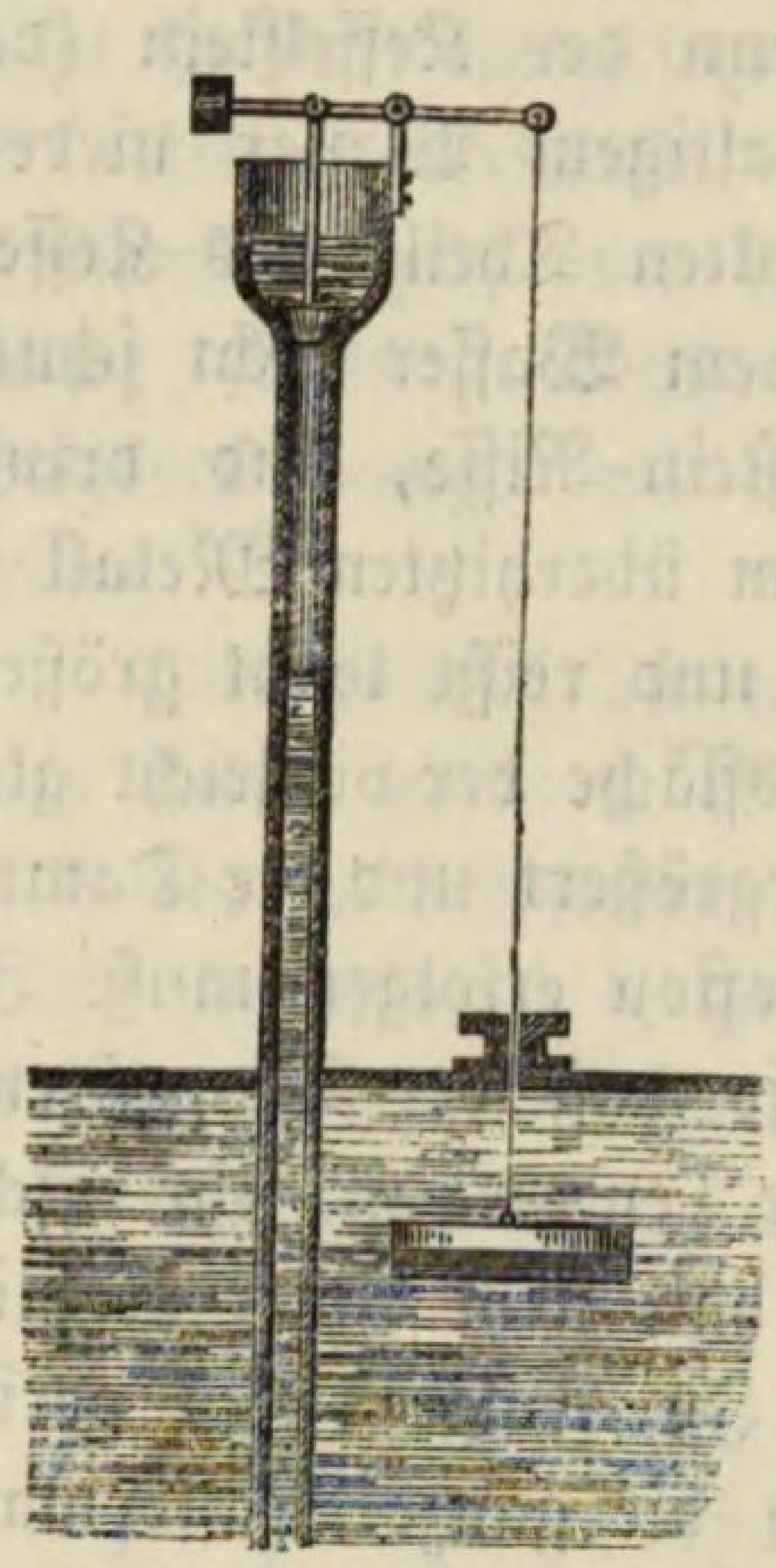
In den seltensten Fällen trägt die mangelhafte Construktion der Kessel die Schuld der Explosionen, zumal da dieselben vor dem Gebrauch eine Probe ihrer Widerstandsfähigkeit bestehen müssen. Dagegen hat man als eine sehr häufige Ursache solcher Unglücksfälle den Umstand erkannt, daß einzelne Theile der Kesselwände unter gewissen Umständen zu

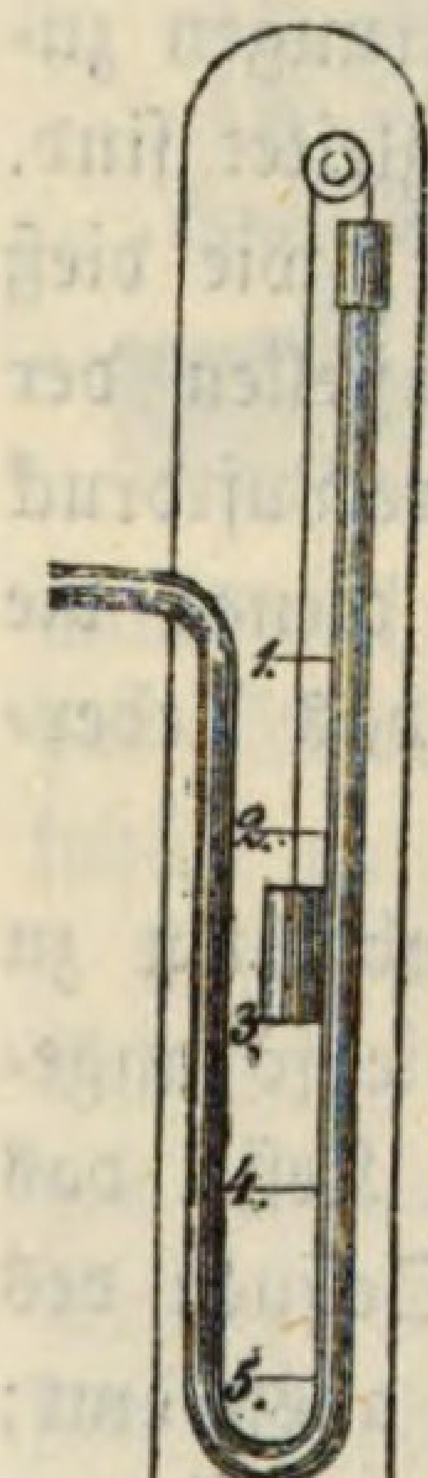
stark erhitzt oder gar glühend werden, wodurch einerseits ihre Festigkeit geschwächt wird, anderseits die plötzliche Bildung einer sehr großen Menge Dampf daraus entstehen muß, wenn das Kesselwasser mit solchen Stellen in Berührung kommt. Diese Fälle können eintreten, wenn dem Kessel nicht genug Wasser zugeführt wird, so daß entweder einzelne Zugröhren im Innern oder Theile der äußern Wand, bis zu denen die Flamme reicht, nicht mehr vom Wasser bedeckt sind. Wenn der Kesselstein (der feste Bodensatz, der sich aus gyps- und kalkhaltigem Wasser niederschlägt) zu dick ist, so werden die davon bedeckten Theile des Kesselbodens leicht übermäßig heiß, weil die Wärme dem Wasser nicht schnell genug mitgetheilt wird; bekommt nun der Kesselstein Risse, und dringt das Wasser in dieselben ein, so tritt es mit dem überhitzten Metall in Berührung, geht plötzlich in Dampfform über und reißt leicht größere Stücke Kesselstein ab, wodurch sich die Berührungsfläche der vielleicht glühenden Kesselwand und des Wassers bedeutend vergrößert und die Dampfbildung so gesteigert werden kann, daß eine Explosion erfolgen muß. Ist in der Kesselwand einmal ein Riß entstanden, so daß der Dampf entweichen kann, so sinkt seine Spannung und seine Temperatur sehr rasch; das Kesselwasser, das eine sehr hohe Temperatur hat, steht daher plötzlich unter einem weit geringeren Druck als vorher. In Folge dieses geringeren Druckes bildet sich mit einem Male durch die ganze Wassermasse hindurch eine ungeheure Menge Dampf, und dieser plötzlichen, massenhaften Dampfbildung sind hauptsächlich die furchtbaren Verheerungen zuzuschreiben, von welchen Dampfkesselexplosionen nicht selten begleitet sind.

Wenn die Spannkraft des Dampfes im Kessel rasch sinkt, wie dieß bei sehr schnellem Zufluß von kaltem Wasser und beim Einstellen der Feuerung eintritt, so kann die Gefahr entstehen, daß der äußere Luftdruck den Kessel zusammendrücke. Zur Verhütung dieses Schadens dienen die Luftventile, die sich nach innen öffen, sobald der Luftdruck das Uebergewicht erhält.

Um jederzeit die Höhe des Wasserstands im Kessel beobachten zu können, dienen zwei übereinander stehende Probehahnen, die so angebracht sind, daß beim regelmäßigen Stand des Wassers im Kessel das Niveau zwischen dieselben zu stehen kommt, so daß beim Oeffnen des obern Hahnens Dampf und beim Oeffnen des untern Wasser ausströmt; gibt daher der obere Hahnen Wasser, so ist der Wasserstand im Kessel zu hoch, strömt dagegen aus dem untern Dampf aus, so ist er zu niedrig. Der gleiche Zweck wird durch das Wasserstandglas erreicht, das S. 14 abgebildet ist; dasselbe kommunizirt durch die obere, horizontale Metallröhre mit dem Dampf im Kessel und durch die untere mit dem Wasser; es muß daher nach dem Gesetz der kommunizirenden Röhren

der Wasserstand in der senkrechten Glasröhre die Höhe des Wasserspiegels im Kessel anzeigen. Ein anderes Mittel, den Wasserstand im Kessel zu erkennen, ist der Schwimmer, eine Art Blechkapsel, die überall geschlossen ist und auf dem Wasser im Kessel schwimmt. Durch einen Draht, der mittelst einer sogenannten Stopfbüchse dampfdicht durch den Deckel des Kessels hindurchgeht, steht der Schwimmer mit einem Zeiger in Verbindung, der die Höhe des Wasserstands an einer Eintheilung anzeigt. Der Schwimmer kann auch dazu dienen, den Kessel selbstthätig mit Wasser zu speisen, indem man ihn mit einem Ventil in Verbindung setzt, das die Speiseröhre schließt und öffnet. Unsere Abbildung stellt einen solchen Schwimmer vor: der Draht des Schwimmers ist am einen Ende eines kleinen zweiarmigen Hebels befestigt, der am andern Ende ein kleines Gewicht trägt. Am linken Hebelarm ist überdieß ein Stäbchen festgemacht, welches unten mit einem Kegelventil endigt, das in die obere Oeffnung der Zuflußröhre paßt; hebt sich bei hohem Wasserstand der Schwimmer, so schließt sich das Ventil; sinkt er mit dem Wasserspiegel im Kessel, so öffnet sich dasselbe und gestattet den Zufluß des Wassers aus dem obern erweiterten Theil der Röhre.

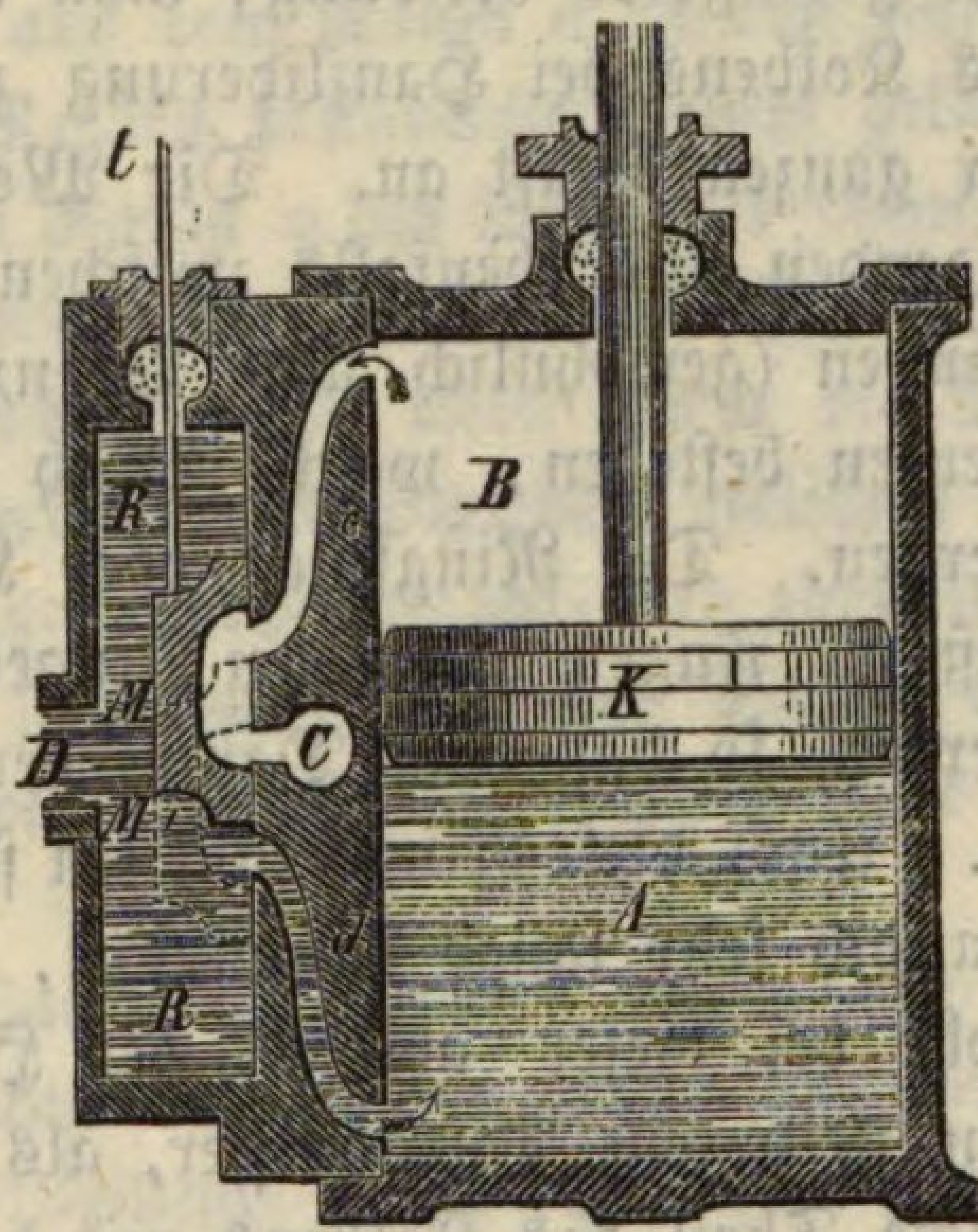




Das Manometer hat den Zweck, die Spannkraft des Dampfes im Kessel zu messen. Von den verschiedenen Arten desselben geben wir in unserer Abbildung das Quecksilberthermometer, wie es bei Dampf von niederem Druck, d. h. von höchstens 3 Atmosphären angewendet wird. Eine heberförmige, eiserne Röhre mündet mit ihrem kürzeren Schenkel durch ein horizontales Stück in den Dampfraum des Kessels; der andere Schenkel ist offen und ungefähr doppelt so hoch als der kürzere. Auf der Oberfläche des Quecksilbers im längern Schenkel ruht ein eiserner Schwimmer, an welchem ein Faden befestigt ist, der über eine Rolle führt und am andern Ende ein kleines Gegengewicht trägt, das als Zeiger dient; die Skale gibt die Spannkraft des Dampfes in Atmosphären an. Nehmen wir an, der Dampf habe eine Spannkraft von einer Atmosphäre, so wird das Quecksilber in beiden Schenkeln gleich hoch stehen, da der Luftdruck dem Druck des Dampfes mit gleicher Stärke ent-

genwirkt; in diesem Fall steht der Zeiger auf 1. Steigt die Spannung des Dampfes auf zwei Atmosphären, so drückt er das Quecksilber im kurzen Schenkel um 14 Zoll nieder, wenn die Röhre überall gleich weit ist, und hebt es im langen Schenkel um eben so viel, so daß der Höhenunterschied der beiden Quecksilberspiegel 28 Zoll beträgt und der Unterschied des Drucks auf beiden Seiten durch das Gewicht der Quecksilbersäule ausgeglichen wird; der Zeiger fällt alsdann bis zur Zahl 2 u. s. f.

Der Cylinder ist eine weite, gußeiserne oder messingene Röhre, deren Länge höchstens das Zwei- bis Dreifache vom Durchmesser beträgt; je nach dem Zweck der Maschine und nach dem dargebotenen Raum wird dieses Verhältniß verschieden angenommen. Der Cylinder ist an beiden Enden geschlossen; der eine Deckel ist gewöhnlich angegossen, der andere dampfdicht aufgeschraubt. Unsere Figur zeigt den Querschnitt eines Cylinders nebst Kolben und Steuerung. Am obern Deckel ist eine Stopfbüchse angebracht, durch welche die Kolbenstange luftdicht hindurch geht. Oben und unten hat der Cylinder seitliche Oeffnungen, durch die der Dampf ein- und austritt; die Kanäle c und d, welche zu

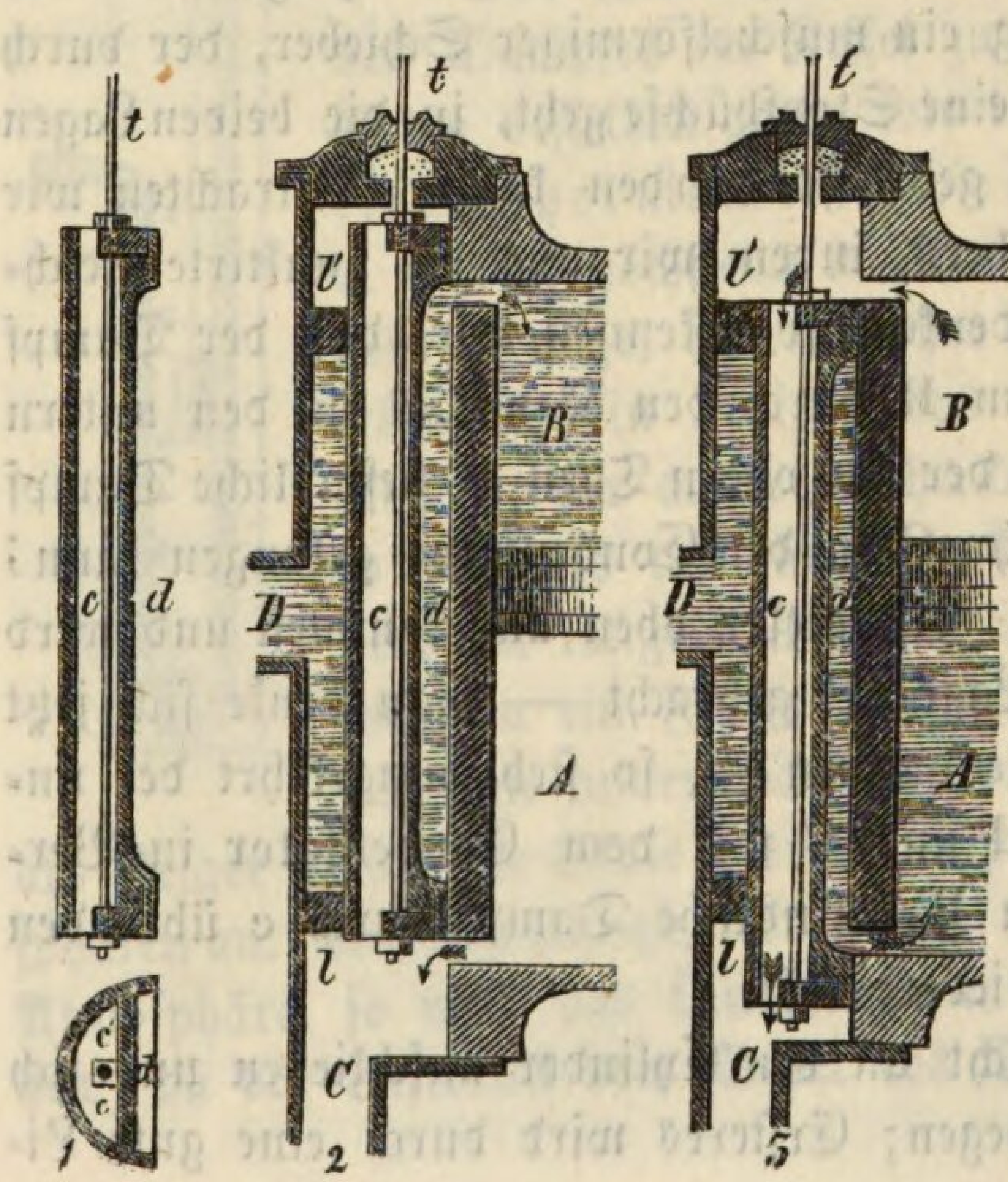


denselben führen, können abwechselungsweise mit dem Condensator und mit dem Dampfraum R in Verbindung gesetzt werden. Hiezu dient die Steuerung, in unserer Zeichnung ein muschelförmiger Schieber, der durch die Stange t, die ebenfalls durch eine Stopfbüchse geht, in die beiden Lagen M (schraffirt) und M' (punktirt) gebracht werden kann. Betrachten wir zuerst die Stellung M des Schiebers, indem wir uns die punktirte Zeichnung M' desselben ganz entfernt denken, so erkennen wir, daß der Dampf ungehindert aus dem Dampfraum R durch den Kanal d in den untern Theil des Cylinders treten, und der im obern Theil B befindliche Dampf durch den Kanal c und das Rohr C in den Condensator gelangen kann; der Kolben wird sich also heben. Ist dieser oben angekommen und wird gleichzeitig der Schieber in die Lage M' gebracht — man denke sich jetzt die schraffirte Zeichnung M weggenommen —, so steht umgekehrt der untere Theil des Cylinders durch d und C mit dem Condensator in Verbindung, während der im Raum R befindliche Dampf durch c über den Kolben tritt und diesen wieder niederdrückt.

Der **Kolben** soll dampfdicht an den Cylinder anschließen und sich mit möglich wenig Reibung bewegen; Ersteres wird durch eine gute Li-

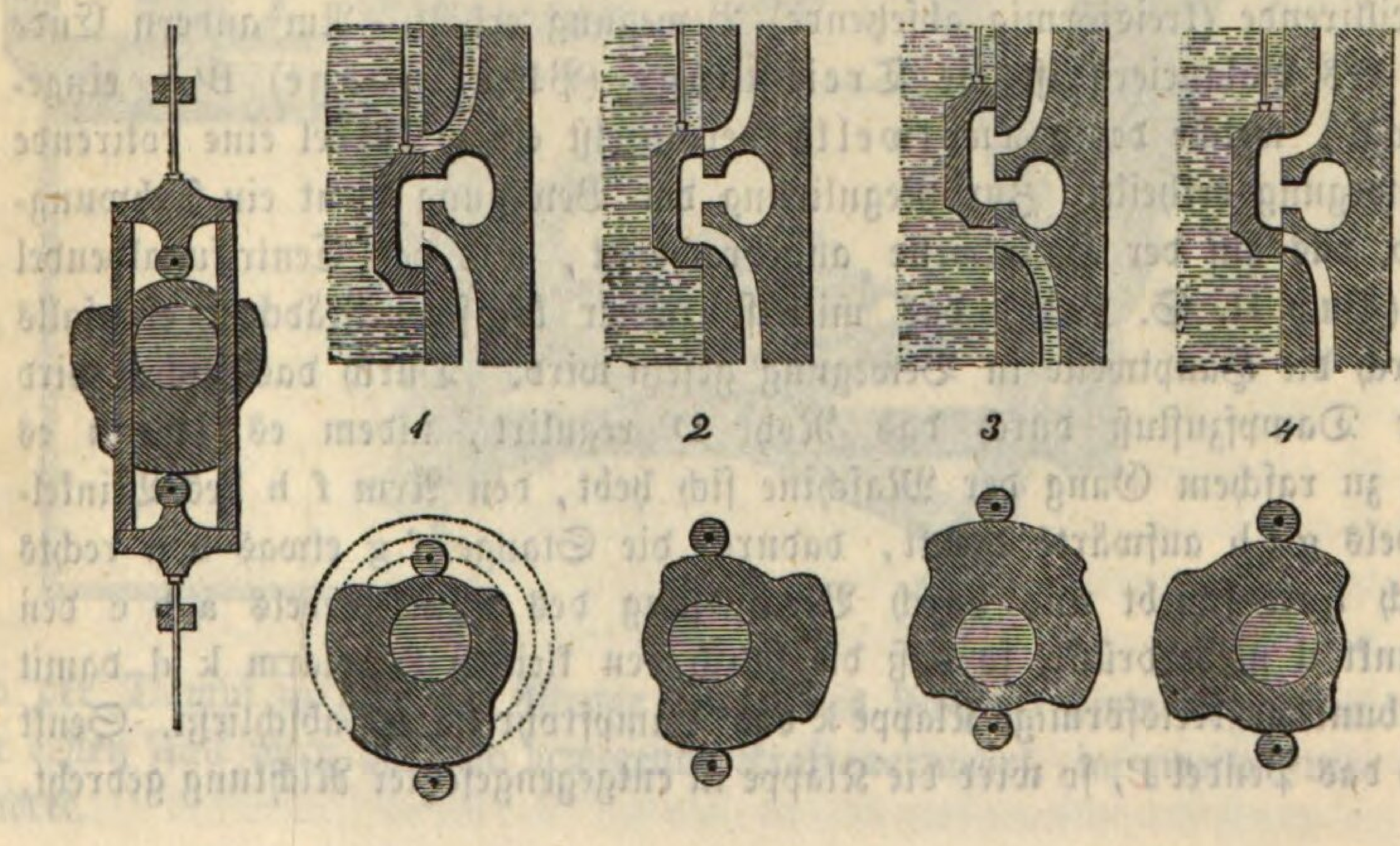
derung oder Packung erreicht, und die Reibung ist um so geringer, je sorgfältiger der Cylinder ausgedreht und polirt ist. Man hat zwei Arten von Packungen, nämlich Hanfpackung und Metallpackung. Die Kolben mit Hanfpackung — hänfene Zöpfe, die um den mittleren rinnenförmigen Theil des Kolbens gewickelt und zwischen den zwei äußeren Platten, dem Bodenstück und der Deckelplatte, mittelst Schrauben eingepreßt sind — haben den Nachtheil, daß sie, namentlich bei hoher Temperatur des Dampfes, sehr schnell zerstört werden. Bei den Kolben mit Metallpackung fällt dieser Nachtheil weg, und außerdem bewegen sich diese mit geringerer Reibung; man nimmt den Kraftverlust durch die Reibung des Kolbens bei Hanfliderung zu 0,12 und bei Metallliderung zu 0,07 der ganzen Kraft an. Die Metallpackung besteht aus zwei übereinander liegenden und ebenfalls zwischen zwei Platten eingeschlossenen metallenen Ringen (gewöhnlich aus Bronze oder Kupfer), die aus 4 oder 6 Segmenten bestehen, welche durch Federn an die Cylinderwand angedrückt werden. Die Ringstücke oder Kreissegmente sind so auf einander gelegt, daß die Fugen des einen Ringes durch die Segmente des andern verdeckt werden, so daß dem Dampf der Durchgang durch diese Fugen verwehrt ist. Auch diese Ringe schleifen sich allmälig ab; der Verschluß bleibt aber dennoch sehr lange dampfdicht, wenn die Federn stark genug sind. Sowohl bei dieser als bei der Hanfliderung sind die äußeren Deckplatten von kleinerem Durchmesser, als die Liderung selbst, so daß nur der elastische Theil des Kolbens mit der Cylinderwand in Berührung kommt.

Die Steuerung. Mit diesem Namen bezeichnet man die Vorrichtungen, wodurch der Dampf in regelmäßigem Wechsel vom Dampfraum in den Cylinder und von diesem in den Condensator oder in die freie Luft geleitet wird. Zu den frühesten Einrichtungen dieser Art gehören die Dampfventile und der Vierwegehahn; heutzutage werden fast ausschließlich Schieberventile angewendet, von denen wir eine Art in der Figur auf der vorhergehenden Seite kennen gelernt haben, welche aber den Nachtheil hat, daß der in den langen Kanälen c und d befindliche Dampf ungenützt verloren geht. Bei Cylindern von



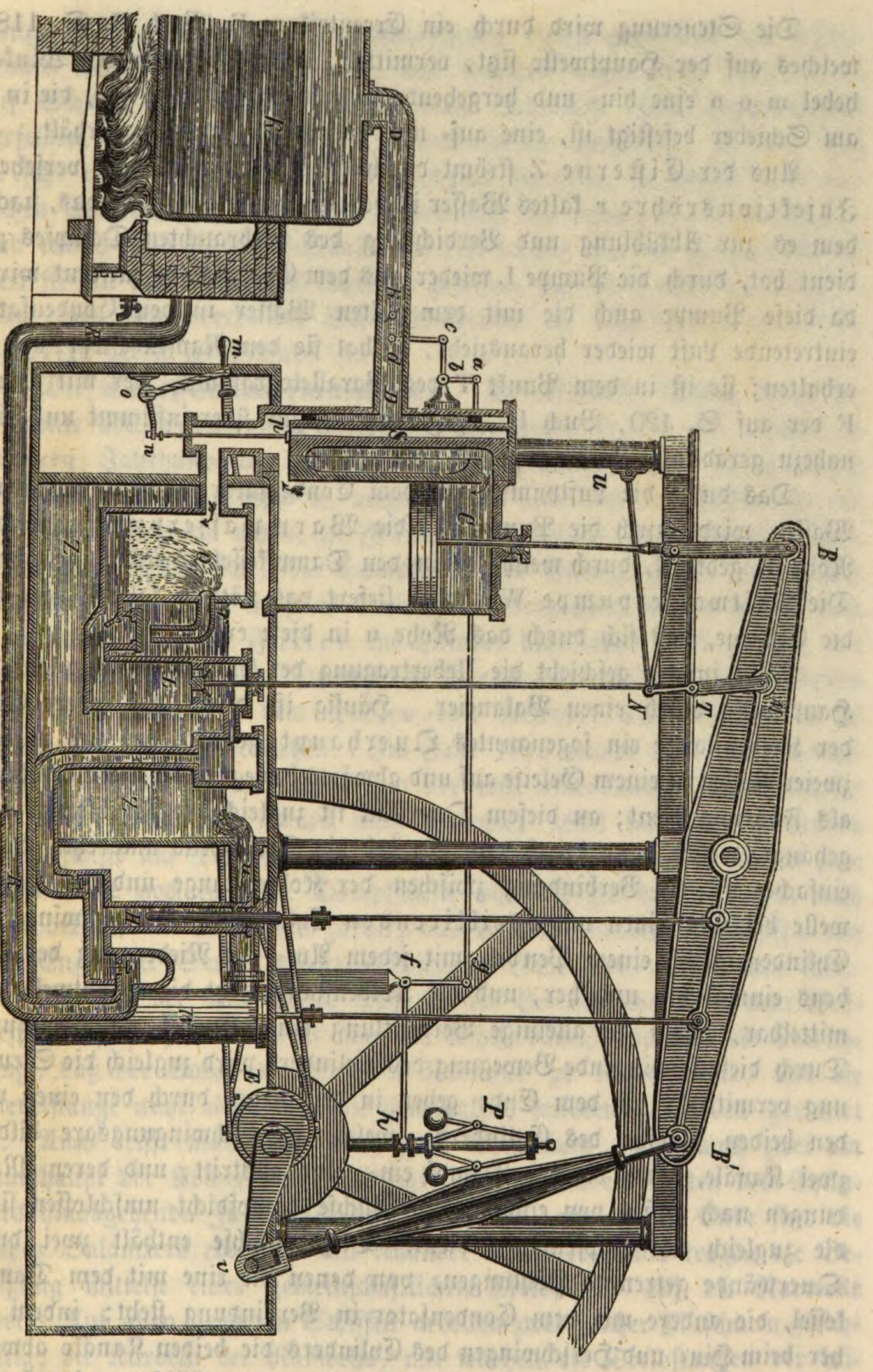
größerem Hub wird daher eine andere Form von Schiebern gebraucht welche in Fig. 1 (S. 134) im Durchschnitt und im Grundriß abgebildet ist. Die Figuren 2 und 3 zeigen die zwei Hauptstellungen dieses Schiebers. Derselbe legt sich an die Seite des Cylinders an, wo sich die Dampföffnungen befinden, und wird durch den Dampf und die ihn umgebenden Liderungen l und l′ fest angedrückt; der bei D eintretende Dampf umspült den Schieber zwischen diesen Liderungen ganz und steht mit dem hohlen Raum d in Verbindung. In der Lage 2 kann demnach der Dampf in den obern Theil B des Cylinders einströmen, während der im untern Theil A enthaltene Dampf durch die Röhre C in den Condensator oder in die Luft entweicht. In der Lage 3 dagegen tritt der Dampf aus dem Raum d in den untern Theil des Cylinders und der über dem Kolben befindliche Dampf gelangt durch den ringsum abgeschlossenen hohlen Raum c des Schiebers ebenfalls in die Abflußröhre C, da ihm kein anderer Weg offen steht. Die Schieberstange t geht oben durch eine Stopfbüchse und wird durch die Maschine selbst auf- und abwärts bewegt, wodurch der Schieber, zwischen den Liderungen und der glatten Seitenwand des Cylinders auf- und abgleitend, abwechselungsweise in die Lagen 2 und 3 kommt, und der Dampf bald von oben, bald von unten auf den Kolben drückt und diesem seine absetzende Bewegung ertheilt.

Bei solchen Maschinen, wo der Dampf abgesperrt wird, ehe der Kolbenhub vollendet ist (von denen weiter unten die Rede sein wird), geht der Schieber von einer äußersten Stellung nicht unmittelbar in die andere über, sondern er hält sowohl beim Hin- als beim Hergang an einer Zwischenlage inne, durch welche der Zufluß des Dampfes in den Cylinder unterbrochen wird. Die hier beigegebene Zeichnung enthält die verschiedenen Lagen des Schiebers für diesen Fall; die horizontale Schraf-



firung stellt den wirksamen Dampf vor, die weiß gelassenen Räume enthalten Dampf, der mit dem Condensator oder mit der Luft kommunizirt. In der Stellung 1 tritt der Dampf in den obern Theil des Cylinders, bei 2 ist dieser abgesperrt; in beiden Lagen steht der untere Theil des Cylinders mit der Oeffnung in Verbindung, welche zum Condensator führt; bei 3 steht dem Dampf der Weg in den untern Theil des Cylinders offen, bei 4 ist die Verbindung mit diesem wieder abgeschlossen; dagegen kann der aus dem obern Theil des Cylinders abziehende Dampf in den beiden letzten Stellungen des Schiebers ungehindert austreten. Die eigenthümliche Bewegung, die hiebei der Schieber machen muß, wird durch ein Excentrikum hervorgebracht, das aus vier Kreisbögen besteht, deren jeder eine andere Entfernung vom Mittelpunkt der Welle hat. In unserer Zeichnung ist ein solches Excentrikum in vier Lagen, wie sie den darüber stehenden Stellungen des Schiebers entsprechen, abgebildet. Bei 1 sind punktirte Kreise angegeben, durch die man die verschiedenen Entfernungen der Kreisbögen vom Mittelpunkt erkennen kann. Die Figur links zeigt die Verbindung der Schieberstange mit dem Excentrikum durch Leitrollen und Leitstangen; die Leitrollen sind auch in den Figuren 1, 2, 3 und 4 beigefügt. Das Uebrige ist von selbst verständlich.

In nachstehender Zeichnung ist das vollständige Bild einer **Watt'**schen **Dampfmaschine** gegeben. Der Dampf gelangt aus dem Kessel K durch das Dampfrohr D zur Maschine, umspült hier zunächst den Schieber S und tritt dann in den Cylinder, bei der in unserer Zeichnung angegebenen Stellung des Schiebers in den obern Raum C desselben. Die Bewegung des Kolbens wird durch die Kolbenstange, welche durch das Parallelogramm A B M N mit dem Gegenlenker U N (Buch II. S. 120) geführt wird, auf den Balancier B B' übergetragen, der dadurch eine oscillirende (kreisförmig absetzende) Bewegung erhält. Am andern Ende B' des Balanciers ist die Treibstange (Pleuelstange) B' v eingehängt, welche der Hauptwelle vermittelst einer Kurbel eine rotirende Bewegung ertheilt. Zur Regulirung der Bewegung dient ein Schwungrad, das auf der Hauptwelle angebracht ist, und das Centrifugalpendel P (Buch II. S. 123), das mittelst zweier konischer Rädchen ebenfalls durch die Hauptwelle in Bewegung gesetzt wird. Durch das Letztere wird der Dampfzufluß durch das Rohr D regulirt, indem es, wenn es bei zu raschem Gang der Maschine sich hebt, den Arm f h des Winkelhebels g f h aufwärts drückt, dadurch die Stange f g etwas von rechts nach links schiebt und durch Vermittlung des Winkelhebels a b c den Punkt d niederdrückt, so daß die durch den kleinen Hebelarm k d damit verbundene kreisförmige Klappe k das Dampfrohr stärker abschließt. Senkt sich das Pendel P, so wird die Klappe in entgegengesetzter Richtung gedreht,



und der Dampf in größerer Menge durch das Rohr D hindurchgelassen. Im ersten Fall wird also die bewegende Kraft vermehrt, im zweiten vermindert.

Die Steuerung wird durch ein Excentrikum E (Buch II. S. 118), welches auf der Hauptwelle sitzt, vermittelt, indem dadurch der Winkelhebel m o n eine hin- und hergehende und so die Stange n p, die in p am Schieber befestigt ist, eine auf- und abgehende Bewegung erhält.

Aus der Cisterne Z strömt durch die mit einem Seiher versehene Injektionsröhre r kaltes Wasser in den Condensator Q ein, das, nachdem es zur Abkühlung und Verdichtung des verbrauchten Dampfes gedient hat, durch die Pumpe L wieder aus dem Condensator entfernt wird; da diese Pumpe auch die mit dem kalten Wasser in den Condensator eintretende Luft wieder herauszieht, so hat sie den Namen Luftpumpe erhalten; sie ist in dem Punkt T des Parallelogramms, der mit Punkt F der auf S. 120, Buch II., gegebenen Figur übereinstimmt und eine nahezu geradlinige Bewegung hat, eingehängt.

Das durch die Luftpumpe aus dem Condensator gezogene erwärmte Wasser wird durch die Pumpe H, die Warmwasserpumpe, in das Rohr R gedrückt, durch welche es in den Dampfkessel zurückgeführt wird. Die Kaltwasserpumpe W endlich liefert das nöthige kalte Wasser für die Cisterne, das sich durch das Rohr u in diese ergießt.

Nicht immer geschieht die Uebertragung der Kolbenbewegung auf die Hauptwelle durch einen Balancier. Häufig ist durch das obere Ende der Kolbenstange ein sogenanntes Querhaupt gesteckt, das sich mittelst zweier Rollen in einem Geleise auf und abwärts bewegt und der Kolbenstange als Führung dient; an diesem Querstück ist zugleich die Treibstange eingehängt, welche dann durch eine Kurbel die Hauptwelle umdreht. Noch einfacher ist die Verbindung zwischen der Kolbenstange und der Hauptwelle bei Maschinen mit oscillirenden Cylindern. Hier schwingt der Cylinder, gleich einem Pendel, mit jedem Auf- und Niedergang des Kolbens einmal hin und her, und die Kolbenstange setzt die Hauptwelle unmittelbar, durch die alleinige Vermittlung einer Kurbel, in Bewegung. Durch diese schwingende Bewegung des Cylinders wird zugleich die Steuerung vermittelt; zu dem Ende gehen in der Regel durch den einen von den beiden Zapfen des Cylinders, welche die Schwingungsaxe bilden, zwei Kanäle, durch die der Dampf ein- und austritt, und deren Mündungen nach außen von einer festen Büchse dampfdicht umschlossen sind, die zugleich als Zapfenlager dient. Diese Büchse enthält zwei durch Querwände getrennte Höhlungen, von denen die eine mit dem Dampfkessel, die andere mit dem Condensator in Verbindung steht; indem daher beim Hin- und Herschwingen des Cylinders die beiden Kanäle abwechselungsweise bald in die eine bald in die andere Höhlung einmünden, setzen sie bald den obern bald den untern Theil des Cylinders mit dem Dampfkessel und je den andern Theil mit dem Condensator in Verbin-

dung. Die oscillirenden Dampfmaschinen bieten gegenüber den feststehenden wesentliche Vortheile dar, und kommen daher auch, insbesondere auf Schiffen, in immer allgemeineren Gebrauch. Ein Hauptvortheil derselben, der sie besonders zu Schiffsmaschinen empfiehlt, ist der, daß sie sehr wenig Raum einnehmen; sodann bedürfen sie wegen ihrer einfachen Construktion seltener der Reparatur, als andere Dampfmaschinen; und endlich sind sie für Schraubendampfer darum von sehr großem Werth, weil sie ein sehr rasches Kolbenspiel zulassen, das auch ohne die Vermittlung eines Räderwerks der Schraubenspindel die erforderliche Geschwindigkeit zu geben im Stande ist.

Die **Schiffsdampfmaschinen**. Der Gedanke, Schiffe durch sogenannte Ruderräder in Bewegung zu setzen, ist sehr alt. Schon in früheren Jahrhunderten wurden Versuche gemacht, diese Räder durch Menschen, Pferde, Ochsen &c. umzudrehen, und von der Erfindung der Dampfmaschinen an wurde in Frankreich, England und Amerika unermüdet daran gearbeitet, die Dampfkraft zur Bewegung der Ruderräder zu verwenden. Aber meistens blieb es bei Versuchen, bis es endlich dem Amerikaner Robert Fulton im Oktober des Jahrs 1807 gelang, mit dem von ihm erbauten Dampfschiff Clermont die 140 engl. Meilen lange Probefahrt auf dem Hudson von Newyork nach Albany in 32 Stunden glücklich zu bestehen. Im Jahr 1812 wurde das erste Dampfschiff in England gebaut; 1817 kam der erste amerikanische Segeldampfer über den atlantischen Ocean nach Europa; 1822 sah man die ersten Dampfschiffe auf dem Boden- und dem Genfersee; 1838 fuhren zum ersten Male zwei englische Dampfschiffe ohne Segel in 17 Tagen nach Newyork und in 15 Tagen zurück; das erste Schraubendampfschiff, von dem Engländer Smith erbaut, erschien im Jahr 1840 auf offener See.

Die Axe der Ruderräder muß um ein Beträchtliches über dem Wasserspiegel stehen; daher trifft man bei Schiffsdampfmaschinen die Einrichtung, daß der Balancier unter die Radwelle zu liegen kommt und die Pleuelstange nicht abwärts, wie gewöhnlich, sondern nach oben gerichtet ist. Auch trifft man gewöhnlich zwei Balanciers, die durch zwei am Querhaupt der Kolbenstange befestigte und zu beiden Seiten des Cylinders hinabgehende Zugstangen bewegt werden; am andern Ende sind die beiden Balanciers ebenfalls mit einander verbunden, und tragen die Bewegung mittelst einer gemeinschaftlichen Treibstange auf die Radwelle über. Auf allen größeren Schiffen arbeiten zwei solcher Maschinen gleichzeitig; die Kurbeln der Radwelle, mit welchen die Treibstangen der beiden Maschinen verbunden sind, machen alsdann einen rechten Winkel mit einander, so daß der Kolben der einen Maschine eben in der Mitte des Cylinders ankommt, wann der des andern Cylinders an einem Ende, an

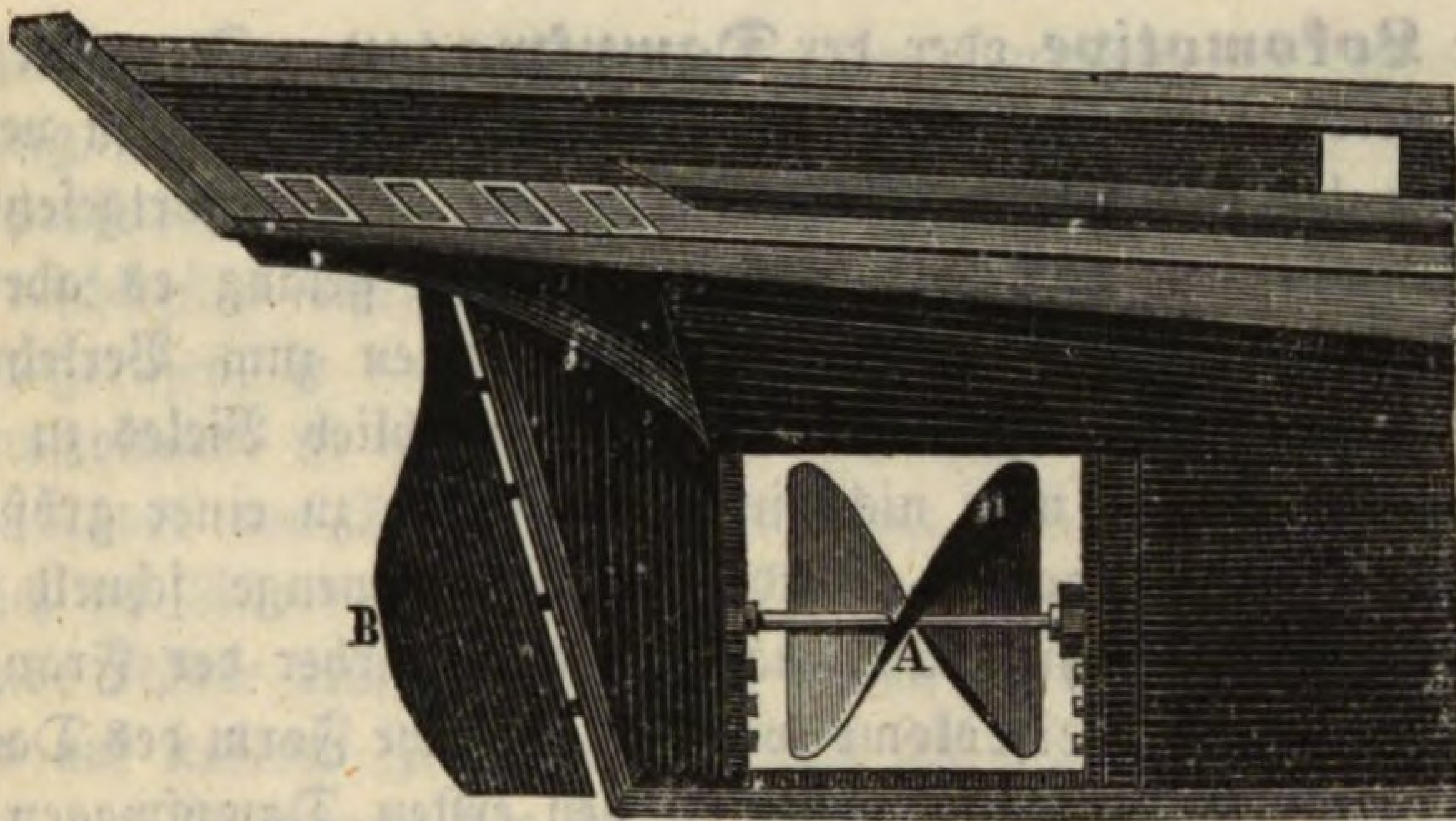
einem sogenannten todten Punkte, anlangt, und so immer wenigstens die eine Maschine mit voller Kraft auf die Räder wirkt. Um Raum zu ersparen, werden in neuerer Zeit fast immer Maschinen ohne Balanciers angewendet; man wählt daher entweder oscillirende Maschinen oder man gibt den Cylindern eine horizontale oder auch eine etwas schiefe Lage, so daß die Treibstangen unmittelbar an die Kolbenstangen befestigt werden können.

Alle Theile der Schiffsmaschinen müssen theils wegen der gewaltigen Erschütterungen, denen sie zuweilen ausgesetzt sind, theils wegen der großen Unregelmäßigkeit der Widerstände, theils endlich wegen der ungleich größeren Gefahr, welche zur See, gegenüber dem Lande, mit Störungen im Gange der Maschinen verbunden ist, außergewöhnlich stark und fest gebaut sein; auch muß ihre Kraft so hoch bemessen werden, daß sie mit Sicherheit allen Launen der Elemente Trotz zu bieten im Stande sind.

Bei den Räderschiffen liegt die Radwelle vor der Mitte des Schiffs; an ihren Enden, zu beiden Seiten des Schiffs, sind die Ruderräder angebracht, die am meisten Aehnlichkeit mit den Schaufelrädern der Schiffmühlen haben, und deren obere Hälfte gewöhnlich von einem hölzernen oder blechernen Kasten eingeschlossen ist. Die Schaufeln, der Zahl nach 12 bis 20, sind theils aus Holz, theils aus Blech verfertigt; bei mäßiger Befrachtung und bei aufrechter Stellung des Schiffs tauchen die Räder nur so tief ein, daß höchstens drei Schaufeln gleichzeitig im Wasser stehen; bei sehr starker Belastung sinken sie tiefer ein, was von nachtheiligem Einfluß ist, weil der Widerstand, der sich dem Austritt der Schaufeln aus dem Wasser entgegenstellt, stets von einem nicht unbedeutenden Kraftverlust begleitet ist. Legt sich das Schiff auf die Seite, so tauchen die Räder ungleich tief ein, und arbeiten alsdann auch ungleich, was wiederum ein nicht zu beseitigender, großer Uebelstand ist. Ein weiterer Nachtheil der Ruderräder besteht darin, daß man sie bei sehr günstigem Wind, wo die Segel allein zur Bewegung des Schiffes hinreichen würden, nicht außer Thätigkeit setzen kann. Endlich ist ein großer und zugleich sehr gefährlicher Mangel der Ruderräder, namentlich auf Kriegsschiffen, daß sie den feindlichen Geschützen zu sehr bloß gestellt sind.

Die Schraubendampfer leiden an diesen Mängeln nicht; dagegen haben sie den Nachtheil, daß sie nicht allgemein anwendbar sind, weil die Lage der Schraube unterhalb des Schiffs einen größern Tiefgang des Schiffes bedingt; auch geht bei denselben mehr Kraft verloren, weil die Schraubenfläche schief auf das Wasser wirkt.

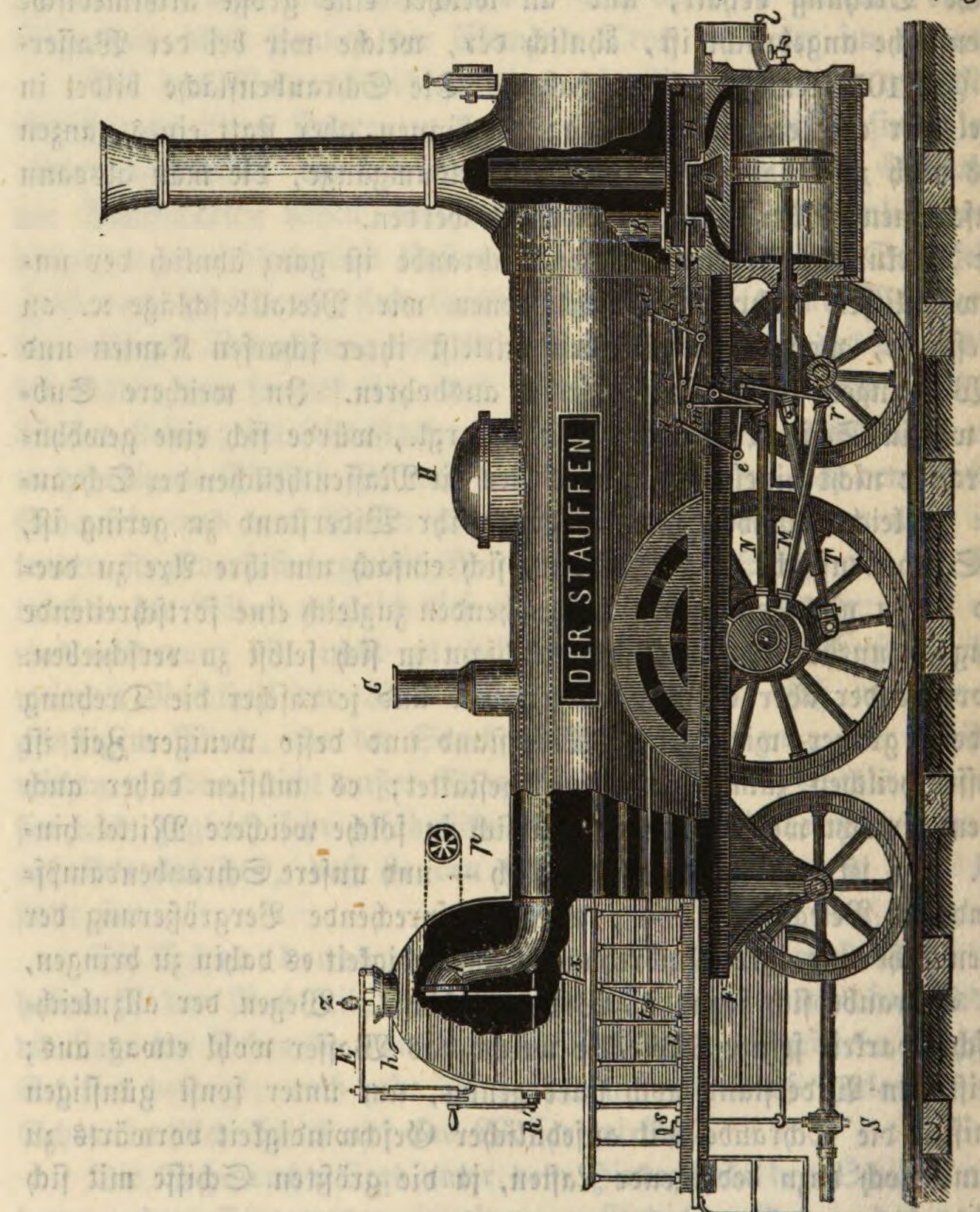
Die Schraube liegt unter dem Hintertheile des Schiffs, unmittelbar vor dem Steuerruder, in einem wasserdichten Kasten, der nach unten



offen ist. Sie besteht in einer Axe, welche von der Dampfmaschine eine sehr rasche Drehung erhält, und an welcher eine große archimedische Schraubenfläche angebracht ist, ähnlich der, welche wir bei der Wasserschraube (S. 107) kennen gelernt haben. Die Schraubenfläche bildet in der Regel nur eine einzige Wirkung; es können aber statt eines ganzen Umgangs auch zwei halbe oder vier Viertelsumgänge, die man alsdann näher zusammen rücken kann, angewendet werden.

Die Wirkungsweise einer solchen Schraube ist ganz ähnlich der unserer gewöhnlichen Schrauben, mit denen wir Metallbeschläge ꝛc. an Holz befestigen, wobei sich dieselben mittelst ihrer scharfen Kanten und breiten Windungen ihre Mutter selbst ausbohren. In weichere Substanzen, wie in Seife, rohe Kartoffeln u. drgl., würde sich eine gewöhnliche Schraube nicht hineinziehen, weil hier die Massentheilchen der Schraubenfläche zu leicht ausweichen und daher ihr Widerstand zu gering ist, um die Schraubenfläche zu verhindern, sich einfach um ihre Axe zu drehen, und sie zu nöthigen, neben der drehenden zugleich eine fortschreitende Bewegung anzunehmen, d. h. sich gleichsam in sich selbst zu verschieben. Je hervorragender aber die Windungen sind und je rascher die Drehung erfolgt, desto größer wird jener Widerstand und desto weniger Zeit ist den Massentheilchen zum Ausweichen gestattet; es müssen daher auch Schrauben gemacht werden können, die sich in solche weichere Mittel hineinziehen. So ist es endlich auch möglich — und unsere Schraubendampfschiffe sind die Belege dafür —, durch entsprechende Vergrößerung der Schraubenfläche und ihrer Umdrehungsgeschwindigkeit es dahin zu bringen, daß eine Schraube sich sogar in Wasser einbohrt. Wegen der allzuleichten Verschiebbarkeit seiner Moleküle weicht das Wasser wohl etwas aus; dennoch ist sein Widerstand noch stark genug, um unter sonst günstigen Verhältnissen die Schraube mit ansehnlicher Geschwindigkeit vorwärts zu treiben und noch dazu bedeutende Lasten, ja die größten Schiffe mit sich fortzuziehen.

Die **Lokomotive** oder der **Dampfwagen.** Der erste Gedanke, die Dampfkraft zur Fortbewegung von Räderfuhrwerken zu verwenden, stammt von Dr. Robinson (1759) in Glasgow. Trotz fortgesetzter, zahlreicher Versuche, die nach ihm gemacht wurden, gelang es aber erst im Jahr 1814 dem Engländer Stephenson, einen zum Verkehr brauchbaren Dampfwagen zu bauen. Auch jetzt noch blieb Vieles zu wünschen übrig; namentlich war man nicht im Stande, die zu einer größeren Geschwindigkeit der Lokomotive erforderliche Dampfmenge schnell genug zu erzeugen. Erst im Jahr 1829, nachdem kurz vorher der Franzose Seguin die noch heute bei Lokomotiven gebräuchliche Form des Dampfkessels erfunden hatte, konstruirte Stephenson den ersten Dampfwagen, der sich in Beziehung auf Geschwindigkeit mit unsern heutigen vergleichen läßt und dem der Erbauer den Namen Rocket, d. h. die Rakete, gab. Von

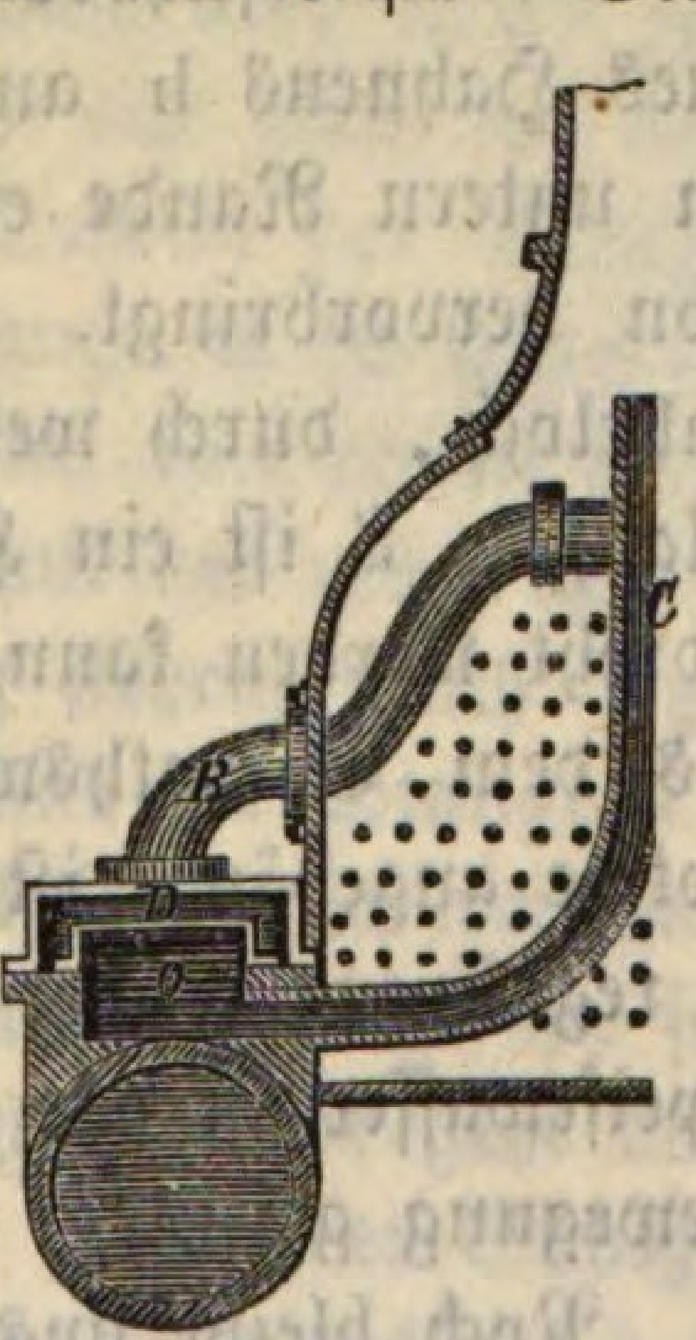


diesem Zeitpunkt an nahm daher das Eisenbahnwesen erst einen größern Aufschwung.

Die vorstehende Zeichnung gibt die Seitenansicht einer Lokomotive in ihren wichtigsten Einzelheiten. Die Hülle des Dampfkessels ist an zwei Stellen abgerissen, so daß ein Blick in das Innere desselben gestattet ist; der Dampfcylinder ist im Durchschnitt gezeichnet.

Die Räder der Dampfwagen sind mit ihren Axen fest verbunden, so daß sich die Räder sammt den Axen drehen; zwei auf der gleichen Axe sitzende Räder müssen daher auch genau gleich groß sein. Das größere Rad auf unserer Zeichnung ist eines der beiden Treibräder; auf diese wird die Bewegung der beiden Kolben mittelst der Treibstangen (T) zunächst übergetragen; die Kurbeln der zwei Treibräder sind, aus demselben Grund wie bei den Ruderrädern, rechtwinklig zu einander gestellt. Die kleinern Räder heißen Tragräder. Da die Zugkraft der Lokomotive neben der Stärke der Dampfmaschine von der Größe der Reibung der Treibräder auf den Schienen abhängt, wie im zweiten Buch bei Gelegenheit der rollenden Reibung ausführlicher gezeigt worden ist, so verlegt man den größten Theil der Last auf die Treibräder, indem man die Federn, durch welche die ganze Maschine auf den Rädern ruht, bei den Treibrädern viel stärker macht als bei den Tragrädern. Aus demselben Grund kuppelt man auch wohl einzelne oder alle Tragräder mit den Treibrädern zusammen.

Auf der linken Seite unserer obigen Zeichnung befindet sich der Feuerkasten F, der von Doppelwänden umgeben ist, die seitlich und oben mit Wasser gefüllt sind, und einen Theil des Dampfkessels ausmachen. Der Rauch und die erhitzte Luft durchziehen den Kessel in 100 bis 200 Röhren von höchstens zwei Zoll Durchmesser, und entweichen, nachdem sie ihre Wärme größtentheils an das Wasser abgegeben haben, durch die Rauchkammer und den Schornstein in die Luft. Diese Heizröhren sieht man in dem aufgerissenen Theil des Dampfkessels links, und in der hier beigegebenen Zeichnung, welche die linke Hälfte der Vorderansicht der Rauchkammer darstellt, sind die vorderen Oeffnungen derselben angedeutet. Der gebildete Dampf sammelt sich in dem hintern erhöhten Theil des Kessels, dem Dom oder der Kuppel, von wo aus er bei A in das Dampfrohr A B eintritt, das den Kessel der ganzen Länge nach durchzieht, vornen in der Rauchkammer in zwei Aesten (der eine ist in der nebenstehenden Figur abgebildet) zu den Cylindern hinabsteigt und bei B in die Dampfräume D eindringt. Die Kuppel ist der eigentliche Dampf-



behälter; sie überragt den übrigen Dampfkessel, damit die Mündung A so hoch gestellt werden kann, daß nicht zugleich mit dem Dampf verspritztes Wasser in die Dampfröhre trete. Der verbrauchte Dampf wird aus dem Cylinder in den Raum O gestoßen und von hier entweicht er durch das Blaserohr C in den Schornstein und in die freie Luft. Da er noch mit ziemlicher Heftigkeit aus dem Blaserohr austritt, so vermehrt er den Luftzug im Schornstein und trägt daher wesentlich zur raschen Verbrennung bei. Condensation des Dampfes kann bei Lokomotiven nicht angewendet werden, weil es unmöglich ist, die große Last des Condensationswassers, das ungefähr das Zwanzigfache des zur Speisung des Kessels erforderlichen Wassers betragen würde, mitzuschleppen.

Das Dampfrohr ist bei A mit einer durchbrochenen Platte verschlossen, die in p abgebildet ist; dicht an dieselbe legt sich eine Scheibe von genau derselben Form an, welche vermittelst einer Kurbel R um ihren Mittelpunkt gedreht werden kann. Da die durchbrochenen Stellen und die dazwischen liegenden Stücke ganz gleich groß sind, so kann die bewegliche Scheibe so gestellt werden, daß entweder alle Löcher auf einander passen und der Dampf in Menge einströmen kann, oder daß nur ein beschränkter Dampfzufluß stattfindet, wenn die ganzen Stücke der Scheibe die Löcher der festen Platte theilweise verdecken; endlich kann die bewegliche Scheibe so weit gedreht werden, daß je ein Loch der einen und eine nicht durchbrochene Stelle der andern Scheibe auf einander passen, und somit das Dampfrohr ganz abgeschlossen ist. Durch diese Vorrichtung, welche der Regulator heißt, kann der Lokomotivführer den Dampfzufluß nach Bedürfniß vermehren oder vermindern oder auch ganz unterbrechen.

Oben an der Kuppel ist ein Federventil mit dem einarmigen Hebel E angebracht. Daneben sieht man die Dampfpfeife z, womit der Lokomotivführer seine Signale gibt; zu diesem Zweck läßt er mittelst eines Hahnens h aus einer feinen Spalte Dampf ausströmen, welcher am untern Rande eines Glöckchens streift und den bekannten pfeifenden Ton hervorbringt. G enthält ein zweites Sicherheitsventil. H ist ein Fahrloch, durch welches man zum Zweck der Reinigung in den Kessel gelangt. S ist ein Hahnen, der durch die Kurbel s vom Lokomotivführer gedreht werden kann und der dazu dient, den Zufluß des Speisewassers aus dem Vorrathswagen oder Tender, der unmittelbar an die Lokomotive angehängt ist und den Bedarf an Holz, Kohle und Wasser führt, zu reguliren; solcher Zuflußröhren sind es zwei; die Pumpen, welche das Speisewasser in den Kessel drücken, werden von der Maschine selbst in Bewegung gesetzt.

Noch bleibt uns übrig, die Vorrichtung zu beschreiben, durch welche

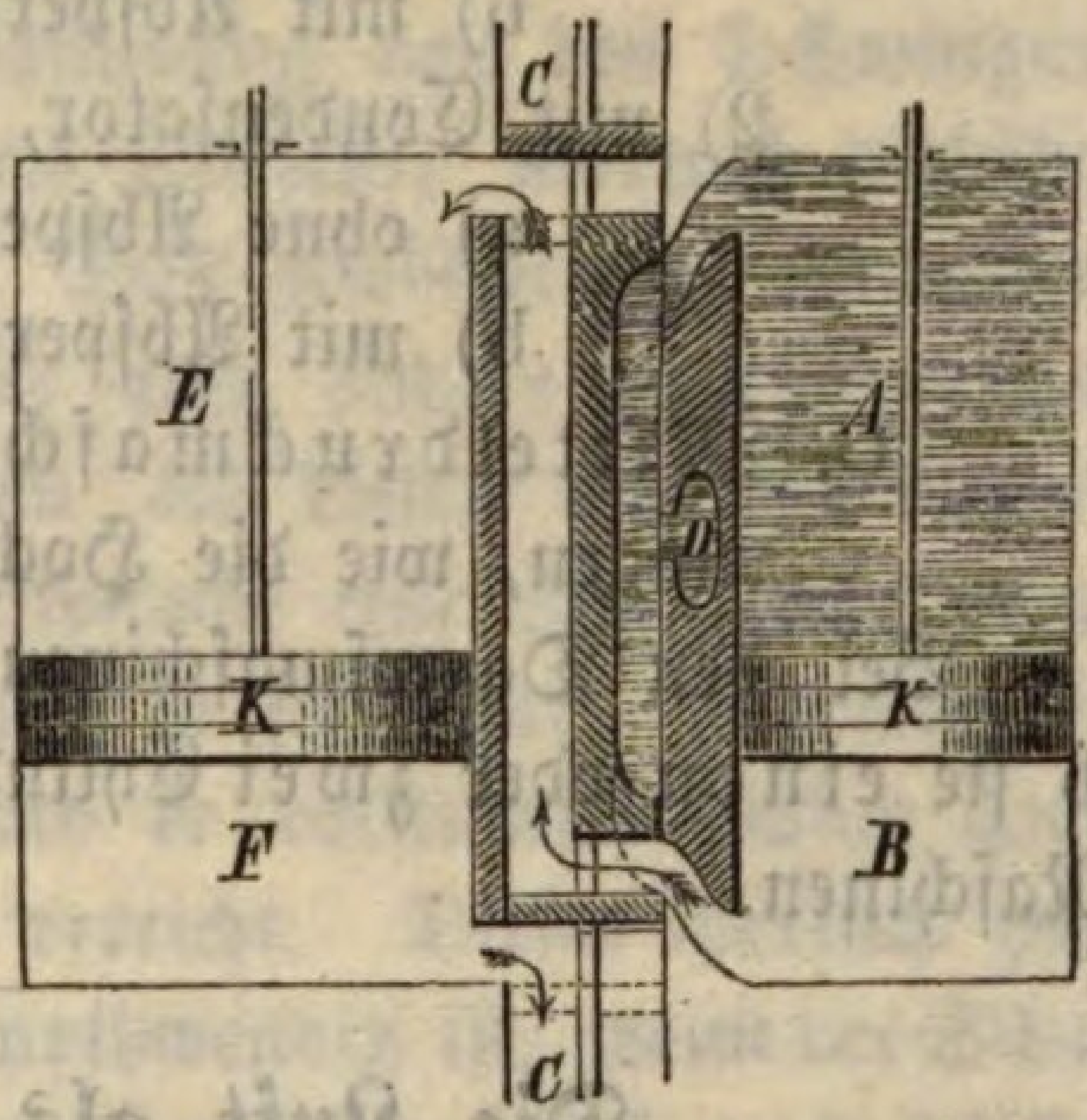
der Lokomotivführer die Lokomotive bald vor- bald rückwärts gehen, bald anhalten lassen kann. Jede der beiden Stangen M und N ist mit einem Excentrikum verbunden und trägt am andern Ende ein gabelförmiges Stück, das zur Aufnahme einer Kurbelwarze bestimmt ist; die Lage des einen Excentrikums ist der des andern gerade entgegengesetzt, so daß sich die Stange M nach links bewegt, wenn N nach rechts geht und umgekehrt. Jede der beiden excentrischen Scheiben mit ihrer Stange kann zur Steuerung gebraucht werden; in unserer Zeichnung steht die Stange N im Eingriff mit dem um n drehbaren Hebel o v, der durch das Verbindungsstück v w das Schieberventil hin und her bewegt. Denken wir uns, die Lokomotive bewege sich vorwärts, so dreht sich das Treibrad wie der Zeiger einer Uhr; die Stange N wird daher im nächsten Augenblick noch weiter gegen rechts und dadurch das Schieberventil noch weiter nach links geschoben werden, so daß der Kolben seine Bewegung in der Richtung des Pfeils vollenden und die Treibstange T das Rad im Sinne der Bewegung eines Uhrzeigers weiter drehen kann. Wäre es möglich, den Hebel v o plötzlich aus der Gabel der Stange N auszulösen und mit der Gabel r der Stange M in Eingriff zu bringen, so würde der Hebel v o im nächsten Augenblick in entgegengesetzter Richtung gedreht und der Schieber, statt nach links, nach rechts gedrückt, und der Dampf könnte links in den Cylinder treten. Statt daß also der Kolben seine Bewegung in der Richtung des Pfeils fortsetzen könnte, würde er durch den plötzlich auf der entgegengesetzten Seite eintretenden Dampf zur Rückkehr gezwungen, die Treibstange würde die Kurbel des Treibrads nach rechts ziehen und das Rad selbst müßte dadurch eine entgegengesetzte, rückgängige Bewegung annehmen; die Lokomotive würde sich also plötzlich rückwärts bewegen. Dieser Wechsel kann nun wirklich ausgeführt werden. Zu diesem Zweck ist der Hebel v o unten mit zwei Kurbelwarzen versehen, von denen die eine nach außen, die andere nach innen gerichtet ist, um sowohl mit der Gabel der Stange N, als auch mit der weiter nach innen liegenden Gabel (die excentrische Scheibe der Stange N liegt vor dem Excentrikum der Stange M) der Stange M in Eingriff gebracht werden zu können. Das Aus- und Einschalten der beiden Gabeln geschieht durch die Stangen m o und l r, welche mit den um e und c drehbaren Winkelhebeln d e l und a c m in Verbindung stehen, welch' letztere ihre Bewegung durch das Verbindungsstück b d und die Stange a t erhalten. Zieht nämlich der Lokomotivführer den Hebel k u so weit zurück, daß er eben so stark nach links, wie jetzt nach rechts, geneigt ist, so wird der Punkt a ebenfalls nach links gezogen; gleichzeitig aber geht der Punkt m abwärts und löst durch das Stück m o die Gabel der Stange N aus, während anderseits der Punkt d durch das Verbindungsstück b d

nach links geschoben, der Arm e l gehoben, und die Gabel der Stange M durch das Stück l r aufwärts gezogen und zum Eingriff mit dem Punkt o des Hebels v o gebracht wird. Damit ist der oben vorausgesetzte Wechsel ausgeführt. Wird dem Hebel k n eine vertikale Stellung gegeben, so sind beide Gabeln aufgelöst und die Steuerung ruht.

Stellen wir zum Schlusse dieses Abschnitts sämmtliche Systeme von Dampfmaschinen zusammen. Die ältesten Dampfmaschinen, nämlich die Newcomen'sche und die erste von Watt, bei welcher er ein Gegengewicht anwandte, waren einfach wirkend; Watt's spätere Maschinen sind doppelwirkend, und seitdem ist nur diese Art im Gebrauch. Anfangs kannte man nur Watt'sche doppelt wirkende Maschinen mit Condensator, bei denen der Dampf höchstens eine Spannung von einer Atmosphäre hatte, da demselben nur der Druck des nicht vollständig condensirten Dampfes, der eine Spannung von höchstens 1/10 Atmosphäre behält, entgegenwirkt. Später war man, namentlich für Lokomotiven, genöthigt, Dampfmaschinen ohne Condensator zu bauen, bei welchen der verbrauchte Dampf in die freie Luft ausströmt. Bei diesen Maschinen muß der Dampf eine höhere Spannung haben, da er schon eine Spannung von einer Atmosphäre braucht, um nur den Gegendruck der Luft zu überwinden; soll daher bei solchen Maschinen noch eine mechanische Wirkung hervorgebracht werden, so kann dieß nur durch Ueberschuß des Dampfdrucks über einen Atmosphärendruck geschehen. Man hat diesen Maschinen den Namen Hochdruckmaschinen gegeben, und die Maschinen mit Condensator Niederdruckmaschinen genannt. Diese Unterscheidung reicht aber nicht mehr aus, da seit lange auch Dampfmaschinen mit Condensator gebaut werden, bei denen der Dampf mit höherem Druck wirkt. Man ist daher heutzutage gewohnt, Maschinen mit Dampf von höchstens 1½ Atmosphären Druck Niederdruckmaschinen, Maschinen mit einer Dampfspannung von mehr als 4 Atmosphären Hochdruckmaschinen, und die dazwischen liegenden Mitteldruckmaschinen zu nennen.

Maschinen, bei welchen der Dampf in voller Stärke während des ganzen Kolbenhubs wirkt, heißen Volldruckmaschinen; ihnen gegenüber stehen die sogenannten Expansionsmaschinen oder Dampfmaschinen mit Absperrung, bei denen der Dampfzufluß während des Kolbenhubs, bei 1/2, 1/3, 1/4 2c. desselben, unterbrochen wird, so daß von diesem Augenblick an, der Dampf durch seine Expansivkraft, d. h. durch die Kraft, mit welcher er sich auszudehnen strebt, wirkt; dieß geschieht mit abnehmender Stärke, je mehr sich sein Volumen vergrößert, und hat seine Grenze da, wo seine Spannung dem Gegendruck nicht mehr gewachsen ist.

Eine andere Absperrungsmethode ist die von Arthur Woolf (1804) mit zwei Cylindern. Der aus dem ersten Cylinder austretende Dampf wird, statt direkt in den Condensator, in einen zweiten größern Cylinder geführt, wo er noch durch Expansion wirkt. Der aus dem Dampfloch D in den obern Theil A des kleinern Cylinders tretende Dampf wirkt mit voller Kraft auf den Kolben k; der aus B abgehende Dampf tritt gleichzeitig in den obern Theil des größern Cylinders und wirkt durch Expansion auf den Kolben k, während der in F befindliche Dampf durch die Röhre C in den Condensator abgeht. Der Dampf in B und in E hat gleiche Spannung, und während er den Kolben K abwärts bewegt und dadurch die Kraft der Maschine vermehrt, wirkt er anderseits auf den Kolben k von unten nach oben, also dem von oben drückenden frischen Dampf entgegen; der Gewinn an Kraft ist daher nur gleich dem Ueberschuß des von oben auf den Kolben K stattfindenden Dampfdrucks über den Druck, welchen der gleiche Dampf von unten auf den kleineren Kolben k ausübt. Hat z. B. der Kolben K einen doppelt so großen Querschnitt, als der Kolben k, so ist die Hälfte des auf K stattfindenden Dampfdrucks Gewinn an Kraft. Es versteht sich von selbst, daß die Spannung des Dampfes in B und E mit der Vergrößerung des Volumens B + E beständig abnimmt. Sind beide Kolben unten angelangt, so treten die Steuerkolben und das Schieberventil in die punktirte Lage. Der neue Dampf tritt alsdann von unten in den kleinen Cylinder; der in A befindliche Dampf verbreitet sich in den untern Theil F des größern Cylinders und aus E entweicht der Dampf durch die obere Röhre C in den Condensator.



Hiernach erhalten wir folgende Zusammenstellung sämmtlicher Arten von Dampfmaschinen:

I. **Einfachwirkende Dampfmaschinen:**
   A. Die Newcomensche oder atmosphärische Dampfmaschine.
   B. Die Watt'sche Maschine mit Gegengewicht.

II. **Doppeltwirkende Dampfmaschinen:**
   A. Niederdruckmaschinen (diese sind stets mit einem Condensator versehen):
      1) ohne Absperrung (älteste Watt'sche doppeltwirkende Dampfmaschine);
      2) mit Absperrung.

B. Hochdruckmaschinen:
1) ohne Condensator (hieher gehören die lokomotiven Maschinen),
a) ohne Absperrnng,
b) mit Absperrung;
2) mit Condensator,
a) ohne Absperrung,
b) mit Absperrung.

C. Mitteldruckmaschinen. Diese haben die gleichen Abänderungen, wie die Hochdruckmaschinen.

Bei den Dampfmaschinen mit Absperrung ist noch zu unterscheiden, ob sie einen oder zwei Cylinder haben; letztere heißen auch Woolf'sche Maschinen.

Die Luft als Trägerin des Schalls.

Akustik
oder
Lehre vom Schall.

Mit dem Worte Schall bezeichnen wir im Allgemeinen die Eindrücke, die wir durch unser Gehörorgan erhalten. Diese Eindrücke bieten eine große Mannigfaltigkeit unter sich dar und die Sprache hat sich einen eben so großen Reichthum von Wörtern zur Bezeichnung derselben geschaffen. Im Folgenden reden wir zunächst vom Schall im Allgemeinen; dann aber werden wir die für uns wichtigste Art des Schalls, nämlich den Ton, einer besondern Betrachtung unterwerfen.

Erzeugung, Fortpflanzung und Reflexion des Schalls.

Wenn die kleinsten Theilchen eines Körpers, deren natürliche Anlagerung durch irgend einen Anstoß gestört wurde, in raschen Schwingungen zu ihrer Gleichgewichtslage zurückkehren, und diese Schwingungen werden durch einen oder mehrere andere Körper bis zu unserm Gehörorgan fortgepflanzt, so vernehmen wir einen **Schall**. Diese Schwingungen oder Vibrationen erfolgen um so regelmäßiger, je gleichförmiger dicht und je elastischer der schwingende Körper ist. Wir bezeichnen mit dem Worte Geräusch den verworrenen Schall, der das Erzeugniß sehr unregelmäßiger Schwingungen eines Körpers ist; Ton oder Klang dagegen nennen wir den Schall, der durch einen regelmäßig vibrirenden Körper hervorgebracht wird. — Am deutlichsten sehen wir diese Schwingungen an einer klingenden

Saite; wir fühlen sie, wenn wir die Zunge einer Maultrommel an unsere Zähne anschlagen lassen; wir empfinden sie, wenn wir eine verhallende Thurmglocke mit der Hand anfassen oder unsere Lippen mit einer tönenden Stimmgabel leicht berühren.

Damit wir durch das Gehör eine Empfindung von den Schwingungen eines Körpers erhalten, bedarf es eines Mittels, wodurch dieselben bis zu unserm Ohr fortgepflanzt werden. Das gewöhnlichste Fortpflanzungsmittel des Schalls ist die Luft; aber auch andere gasförmige, sowie flüssige und feste Körper können als Leiter desselben dienen. Wenn wir unter den Recipienten einer Luftpumpe eine Schlaguhr stellen, so vernehmen wir den Ton der Glocke um so schwächer, je weiter die Verdünnung der Luft getrieben wird, und er verstummt endlich ganz, wenn die Verdünnung einen hohen Grad erreicht. Dieser Versuch zeigt deutlich, daß eine ununterbrochene Leitung nothwendig ist, wenn der Schall zu unserm Ohr gelangen soll. Um uns zu überzeugen, daß auch flüssige Körper den Schall fortpflanzen, dürfen wir nur unter Wasser tauchen und zwei Steine an einander schlagen; wenn man in einem großen, ruhigen See badet, so hört man unter dem Wasser die Schläge der Dampfschiffräder auf eine große Entfernung hin, ja auf eine viel größere, als wenn der Schall durch die Luft fortgepflanzt würde. Leute, die in Schächten oder in Erzgruben arbeiteten, haben zuweilen den Kanonendonner einer viele Meilen weit entfernten Schlacht deutlich vernommen, während über der Erde nicht das Mindeste gehört werden konnte; die Hufschläge einer Reitertruppe kann man aus weiter Ferne schon vernehmen, wenn man in ruhiger Nacht das Ohr an den Erdboden anlegt; den leichtesten Schlag, den man mit dem Knopf einer Stecknadel auf das eine Ende eines langen Balkens, Stabes oder Tisches ausführt, und den unmittelbar daneben stehende Personen nicht hören können, vernimmt derjenige sehr deutlich, der das Ohr nahe an das andere Ende des Balkens rc. hält: der Schall wird also auch durch feste Körper besser fortgepflanzt, als durch die Luft.

Bei der **Fortpflanzung des Schalls** in der Luft wird diese selbst in Vibration versetzt. Mit jeder Schwingung nämlich stößt ein vibrirender Punkt die Luft bald nach der einen bald nach der andern Richtung fort, und macht dadurch, daß dieselbe, vermöge ihrer Zusammendrückbarkeit, abwechslungsweise auf der einen Seite verdichtet und auf der entgegengesetzten verdünnt wird. Die verdichtete Luft wirkt selbst auch wieder verdichtend auf ihre Nachbartheilchen, indem sie sich ausdehnt, um zu ihrer ursprünglichen Dichte zurückzukehren; umgekehrt folgt jeder Verdünnung eines Theils der Luft eine Verdünnung der benachbarten Theile, sobald die Lufttheilchen von allen Seiten herzuströmen, um den Verlust

der verdünnten Luft zu ersetzen. Auf diese Art pflanzen sich die auf einander folgenden Verdichtungen und Verdünnungen der Luft, ähnlich den Wellenbergen und Wellenthälern des Wassers, nach allen Seiten fort und bilden sogenannte Schallwellen.

Wie die Wasserwellen in Kreisen sich verbreiten und in dem Maß schwächer werden, als sie sich vom Mittelpunkt entfernen, bis sie endlich dem Auge ganz verschwinden, so bilden die Schallwellen in ruhiger Luft Kugeloberflächen von stets wachsendem Halbmesser und ihre Stärke nimmt in dem Verhältniß ab, als das Quadrat der Entfernung vom Entstehungspunkt oder das Quadrat des Kugelhalbmessers wächst. Hieraus ergibt sich:

Die Stärke des Schalls steht im umgekehrten Verhältniß zu dem Quadrat der Entfernung;

d. h. in doppelter Entfernung vom Entstehungsort ist der Schall viermal schwächer, als in der einfachen Entfernung. Da, wie wir schon oben angedeutet haben, der Schall im Allgemeinen mit um so größerer Stärke fortgepflanzt wird, je dichter das Fortpflanzungsmittel ist, so muß dieß auch für die Luft gelten.

Die Schallstärke steht im geraden Verhältniß zur Dichte der Luft.

Dieß ist der Grund, warum eine Pistole stärker knallt, wenn sie im Thal, als wenn sie auf einem hohen Berg abgefeuert wird; deßhalb klingt die Stimme kräftiger im Winter, als im Sommer; aus diesem Grunde tönt der Gesang voller in einem kalten Zimmer, als in einem warmen u. s. f. Wenn die Schallwellen gezwungen werden, sich nur nach einer Richtung hin fortzupflanzen, statt sich nach allen Seiten zu verbreiten, so nimmt ihre Stärke viel langsamer ab und der Schall bleibt daher auf weit größere Entfernung hin hörbar. Hierauf beruht die Einrichtung des Sprachrohrs und der Communikationsröhren zwischen entlegenen Geschäftslokalen in Gasthöfen, Fabriken u. drgl. Die Entfernung, bis auf welche der Schall noch gehört wird, hängt unter sonst gleichen Verhältnissen von der anfänglichen Stärke der Schallwellen und daher von der Masse des Körpers, der den Schall erzeugt, und von der Größe und Geschwindigkeit seiner Schwingungen ab: deßhalb hört man eine Kanone weiter als eine Pistole, eine Thurmglocke weiter als ein Tischglöckchen, eine Männerstimme weiter als den Ruf eines Kindes u. s. f. Ein Kanonenschuß kann 20 bis 30 Meilen, ein Pistolenschuß ungefähr eine Stunde, die menschliche Stimme nicht leicht über 800 bis 1000 Fuß weit gehört werden.

Der Schall verbreitet sich in ruhiger Luft mit gleichförmiger Geschwindigkeit.

In doppelter Entfernung hört man daher einen Schall auch erst in der doppelten Zeit. Wenn ein Regiment Soldaten in langer Kolonne auf ebener Straße nach dem Takt der Musik marschirt, so bemerkt man daran ein eigenthümliches, wellenförmiges Schwanken, welches eben darin seinen Grund hat, daß die einzelnen Glieder der Kolonne die Musik um so später hören, je weiter sie davon entfernt sind.

Der Druck der Luft hat keinen Einfluß auf die Geschwindigkeit des Schalls.

Der Schall pflanzt sich also in höhern Regionen ebenso schnell fort, als in tiefer liegenden Luftschichten. Dagegen wird

die Geschwindigkeit des Schalls durch eine Zunahme der Temperatur vergrößert, und durch eine Abnahme derselben vermindert.

Der Schall pflanzt sich also im Sommer im Allgemeinen schneller fort, als im Winter; bei mittlerer Temperatur bewirkt eine Erhöhung derselben um 1° eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit von ungefähr 2 Fuß.

Die Natur des Schalls kommt bei der Fortpflanzungsgeschwindigkeit desselben nicht in Betracht.

Der heftigste Knall pflanzt sich nicht schneller fort als ein Glockenschlag, der höchste Ton einer Flöte mit gleicher Geschwindigkeit, wie die Brummtöne einer Baßgeige. Was müßte aber auch aus der schönsten Musik, in größerer Entfernung gehört, werden, wenn hierin eine Verschiedenheit stattfände.

Die **Geschwindigkeit des Schalls** in der Luft bei 0° Temperatur beträgt 341 Meter oder 1050 Par.Fuß in der Sekunde. Wasser leitet den Schall ungefähr 4mal schneller, Gußeisen 10, Holz 10 bis 18 (Tannenholz 18), Stahl und Schmiedeisen 16²/₃ und Glas 17mal schneller, als die Luft.

Das Licht, das in der Sekunde 42500 Meilen zurücklegt, braucht, um die größten Entfernungen, bis zu denen wir auf der Erde sehen können, zurückzulegen, eine außerordentlich kleine Zeit, so daß wir sie im Vergleich zu der, welche der Schall nöthig hat, gleich Null betrachten können. Daher kommt es, daß wir das Feuer einer in größerer Entfernung abgeschossenen Kanone lange vorher sehen, ehe wir den Knall vernehmen. Dies gibt ein Mittel an die Hand, große Entfernungen annähernd zu messen; verstreichen z. B. von dem Augenblick an, wo wir das Feuer einer Kanone sehen, bis zu dem Zeitpunkt, wo wir den Knall vernehmen, 12 Sekunden, so ist die Entfernung, die uns vom Ort der Kanone trennt, das Zwölffache von der Geschwindigkeit des Schalls, d. i. 12 . 1050 =

12600 Fuß oder annähernd eine Stunde (13000′). Findet in der einen oder andern Richtung zwischen den beiden Aufstellungspunkten eine Luftströmung Statt, so findet man die Entfernung derselben dadurch, daß man auf beiden Punkten Feuergewehre losschießt und aus den Erfunden beider Beobachtungen das arithmetische Mittel nimmt. Auch auf die Entfernung eines Gewitters läßt sich aus der Zeit schließen, die zwischen dem Blitz und dem darauf folgenden Donner verstreicht; zählt man z. B. 36 Sekunden, so ist das Gewitter noch 3 Stunden oder 1½ Meilen entfernt.

Wie die Wellen des Wassers, so durchkreuzen sich auch die Schallwellen, ohne sich gegenseitig in ihrer selbständigen Ausbreitung zu hemmen. An den Kreuzungspunkten entsteht entweder eine Verstärkung des Schalls oder eine Schwächung desselben; ersteres tritt ein, wenn zwei Luftverdünnungen oder zwei Luftverdichtungen zusammen treffen, letzteres, wenn eine Luftverdünnung und eine Luftverdichtung sich begegnen; es ist hier dasselbe Verhältniß wie bei den Wellenbergen und Wellenthälern des Wassers. Diese gegenseitige Einwirkung der sich begegnenden Wellensysteme nennt man **Interferenz** der Wellen. Daß die Schallwellen sich wirklich gegenseitig nicht stören, erkennen wir am deutlichsten daraus, daß wir mehrere, von verschiedenen Punkten ausgehende Töne gleichzeitig hören und dabei recht gut jeden einzelnen unterscheiden können. In welches verworrene Chaos würden die reinsten Akkorde eines Orchesters verwandelt, wenn nicht die Schallwellen jedes einzelnen Tons ungestört und unverwischt zum Ohre dringen könnten!

Wenn Schallwellen gegen eine feste Wand stoßen, so werden sie nach demselben Gesetz zurückgeworfen, wie alle elastischen Körper, d. h. der Einfalls- und der Ausfallswinkel jedes einzelnen Lufttheilchens sind gleich groß, und es bilden sich dadurch, wie wir auch bei den Wellen des Wassers gesehen haben, wiederum Wellen, aber von entgegengesetzter Richtung, deren Mittelpunkt ebenso weit hinter der festen Wand liegt, als die wirkliche Quelle des Schalls vor derselben. Der **Zurückwerfung** oder **Reflexion der Schallwellen** verdanken wir das **Echo** oder den **Wiederhall.** Das Echo entsteht, wenn die feste Wand, an der die Schallwellen zurückprallen, so weit von uns entfernt ist, daß der zurückgeworfene Schall von dem ursprünglichen deutlich unterschieden werden kann; folgt das Echo dem Hauptschall so schnell, daß nicht die geringste Unterbrechung zwischen beiden bemerkbar ist, so bezeichnen wir dieß mit dem Namen **Nachhall**, den wir in Kirchen, Sälen, großen leeren Zimmern u. s. w. als eine Verstärkung der Stimme wahrnehmen. Unser Ohr ist nur dann im Stande, mehrere auf einander folgende Laute so von einander zu unterscheiden, daß der Eindruck, den wir dadurch erhalten, nicht der eines ununterbrochenen Ganzen wird, wenn nicht mehr

als 9 auf die Sekunde kommen, oder wenn zwischen je zwei Lauten wenigstens 1/9 Sekunde verstreicht. Der Schall legt aber in der Sekunde einen Weg von 1050 Fuß zurück, also in 1/9 Sekunde 1050/9 oder 116 2/3 Fuß. Sprechen wir daher einer Felswand gegenüber ein kurzes einsylbiges Wort wie „hopp!“ laut aus, so wird ein Echo hörbar sein, wenn der Weg des Schalls hin und her wenigstens 116 oder die Entfernung der Felswand von uns 58 Fuß beträgt; bei geringerer Entfernung vernehmen wir nur einen Nachhall. Sprechen wir ein zweisylbiges Wort, wie z. B. „holla!“ in einer Entfernung von 58 F. aus, so ruft uns das Echo nur die zweite Sylbe „la“ nach, weil die Sylbe „hol“ des Echo's mit der von uns gesprochenen Sylbe „la“ zusammenfällt und dadurch verdeckt wird. Soll das ganze Wort „holla“ im Echo gehört werden, so müssen wir auf eine Entfernung von 2 . 58 oder 116 Fuß von der Felswand zurücktreten; ein dreisylbiges Wort gibt erst in einer Entfernung von 3 . 58 oder 174 Fuß ein vollständiges Echo u. s. w. Wenn zwei oder mehrere Gegenstände so einander gegenüberstehen, daß nicht allein der ursprüngliche Schall selbst, sondern zuweilen auch das Echo desselben wiederholt von denselben zurückgeworfen werden, so entsteht ein mehrfaches Echo.

Die Wirkungen des Echos sind in der That oft großartig. Wer hat nicht schon auf einem Gipfel einer größern Gebirgskette stehend das tausendfältige Echo des zwischen Thälern und Schluchten verhallenden Donners bewundert, oder wer ist nicht schon durch den donnerähnlichen Wiederhall eines Böllerschusses zwischen den steilen Uferwänden eines Flusses oder eines eng eingeschlossenen Sees in Erstaunen gesetzt worden! Prachtvoll ist z. B. der Wiederhall auf dem Rhein beim Loreley-Felsen und auf dem Königssee bei Berchtesgaden. Das Echo bei Derenburg in der Nähe von Halberstadt spricht 27 schnell nach einander ausgesprochene Sylben vollständig nach; das bei Adersbach in Böhmen wiederholt 7 Sylben 3mal nach einander; im Woodstock-Park in der englischen Grafschaft Oxfordshire werden bei Tag 17, bei Nacht 20 Sylben vom Echo deutlich wiedergegeben und in der Villa Simonetta bei Mailand antwortet dem Rufenden ein 30faches Echo.

Die Parabel, eine Linie, die wir im ersten Buche (S. 104) kennen gelernt haben, hat die Eigenschaft, daß je zwei Linien, die an einen und denselben Punkt derselben gezogen werden, und von denen die eine mit der Axe parallel läuft, die andere vom Brennpunkt der Kurve ausgeht, mit dem Loth des betreffenden Elements gleiche Winkel bilden. Schallstrahlen, welche parallel mit der Axe auf eine parabolisch gebaute Wand treffen, werden daher stets in den Brennpunkt zurückgeworfen; umgekehrt wird ein vom Brennpunkt ausgehender Schall von allen Theilen der parabolischen Wand in der Richtung der Axe zurückgeworfen. Bei ellipti-

schen Wänden wird der von dem einen Brennpunkt ausgehende Schall in den andern Brennpunkt reflektirt, so daß das leiseste Geflüster am einen Brennpunkt auf eine bedeutende Entfernung im andern Brennpunkt deutlich verstanden werden kann, während an andern Stellen des Gebäudes selbst in einiger Nähe des Redenden, vielleicht nicht das Mindeste gehört wird. Das sogenannte Ohr des Dionys in den Gefängnissen von Syrakus war nach einer Parabel gebaut, so daß er an einem bestimmten Punkt, dem Brennpunkt, die leiseste Unterhaltung der Gefangenen verstehen konnte. Elliptische Sprachgewölbe finden wir z. B. in der Paulskirche zu London, in der Peterskirche zu Rom. — Beim Bau von Hörsälen, Kirchen, Konzertsälen u. s. w. ist auf diese Verhältnisse Bedacht zu nehmen, wenn die Redner, Singchöre oder Orchester von allen Zuhörern gut gehört werden sollen. Säle, die in dieser Beziehung zweckmäßig eingerichtet sind, heißen akustisch gebaut.

Der Ton.

Ein Ton wird durch regelmäßige Schwingungen eines Körpers hervorgebracht. Wenn die Richtung der Schwingungen zur Länge des schwingenden Körpers senkrecht steht, so heißen sie Quer- oder Transversalschwingungen; vibriren dagegen die einzelnen Theile der Körper in der Richtnug seiner Länge, so heißen sie Längen- oder Longitudinalschwingungen; eine dritte Art sind die drehenden Schwingungen, die von geringerer Wichtigkeit für uns sind. Transversalschwingungen entstehen z. B. bei einer Saite, wenn sie mit einem senkrecht zu ihr gerichteten Violinbogen angespielt wird; Longitudinalschwingungen, wenn sie, etwa mit einem Tuch, das mit etwas Kolophoniumpulver eingerieben wurde, der Länge nach, oder mit einem Violinbogen, der mit ihr fast gleich gerichtet ist, gestrichen wird.

Ein Ton ist um so höher, je mehr Schwingungen der tönende Körper in einer gegebenen Zeit macht, und umgekehrt.

Dabei finden jedoch sowohl nach oben als nach unten Grenzen Statt, indem wir einerseits die Höhe eines Tons mit unserm Ohr nicht mehr zu beurtheilen vermögen, wenn die Zahl der Schwingungen (eine Schwingung umfaßt eine volle Hin- und Herbewegung) eine gewisse Grenze, 20—24000 in der Sekunde, übersteigt, während wir anderseits sehr langsam auf einander folgende Schwingungen möglicherweise nicht mehr als ein zusammenhängendes Ganzes hören; nach Savart ist diese untere Grenze die Schwingungszahl 8 in der Sekunde; übrigens verändern sich diese Grenzen theils mit der Stärke der Schwingungen, theils mit der Feinheit des Gehörs.

Mittelst der Sirene kann man die Zahl der Schwingungen für jede beliebige Tonhöhe unmittelbar bestimmen. Dieses Instrument wurde von Cagniard de la Tour erfunden und besteht aus drei Hauptheilen, nämlich aus einem cylindrischen, etwa 2 bis 3 Zoll weiten und 1 Zoll hohen Luftkasten, der mit einem Blaserohr versehen ist, einer rotirenden Scheibe und einem Zählapparat. Der Luftkasten ist oben durch eine Scheibe geschlossen, die mit ungefähr 25 senkrecht durchgebohrten runden Löchern versehen ist, welche gegen den Rand hin in einem Kreise stehen, und durch welche die Luft aus dem Luftkasten entweichen kann. Unmittelbar darüber, doch so, daß zwischen beiden Scheiben keine Reibung stattfindet, ist die rotirende Scheibe angebracht, welche eben so viele Durchbohrungen hat, die genau auf die Löcher der festen Scheibe passen, und von diesen nur dadurch sich unterscheiden, daß sie schief gestellt sind, so daß die bewegliche Scheibe beim Einblasen von Luft in den Luftkasten durch die aus den Löchern des Deckels ausströmende Luft in Rotation gesetzt wird. So oft nun bei der Umdrehung der beweglichen Scheibe je zwei Löcher auf einander passen, strömt durch dieselben etwas Luft aus, wodurch die äußere Luft fortgestoßen wird; wenn aber die zwischen zwei Löchern der beweglichen Platte befindlichen Zwischenräume, die etwas breiter sind als der Durchmesser der Löcher, die Oeffnungen der festen Platte bedecken, so wird jedesmal der Luftstrom unterbrochen. Dreht sich daher die bewegliche Scheibe rasch um, so wird die äußere Luft durch die schnell aufeinanderfolgenden Stöße der aus dem Luftkasten austretenden Luft in Schwingung gesetzt, und es entsteht ein Ton, so bald die Drehung der beweglichen Scheibe schnell genug vor sich geht. Bei jeder einzelnen Umdrehung dieser Scheibe erfolgen an einem bestimmten Punkt 25 Stöße und also auch 25 Schwingungen der Luft; dreht sich daher die Scheibe in einer Sekunde z. B. 20mal, so ist die Zahl der Schwingungen 500. Der Zählapparat dient nun dazu, mittelst eines gezahnten Rädchens und einer auf der Axe der rotirenden Scheibe angebrachten endlosen Schraube die Zahl der Umdrehungen in einer bestimmten Zeit anzugeben, woraus die dem hervorgebrachten Ton entsprechende Schwingungszahl berechnet werden kann. Gibt z. B. der Zählapparat in 10 Sekunden 800 Umdrehungen an, so ist die Zahl der Schwingnngen für den betreffenden Ton 80 . 25 oder 2000 per Sekunde.

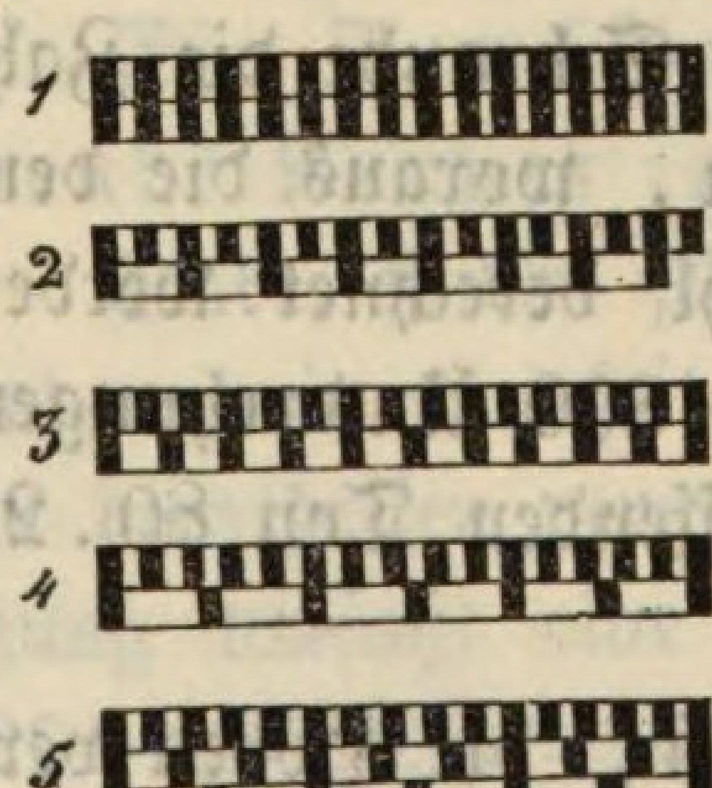
Um die Schwingungszahlen oder, was dasselbe ist, die Höhen verschiedener Töne mit einander zu vergleichen, bedient man sich des Monochords, eines langen, aus dünnen Brettchen zusammengefügten Kästchens, das zur Verstärkung des Tons dient, und über welches eine Saite gezogen ist, die durch angehängte Gewichte stärker oder schwächer gespannt und durch einen verschiebbaren Steg verlängert oder verkürzt werden

kann. Die Anwendung dieses Instruments gründet sich zunächst darauf, daß die Zahl der Schwingungen einer Saite zu ihrer Länge im umgekehrten Verhältniß steht, daß also z. B. eine doppelt so lange Saite nur halb so viel Schwingungen macht als eine Saite von der einfachen Länge u. s. w.

Um die Töne nach ihrer Höhe unter sich zu vergleichen, nimmt man einen bestimmten Ton, etwa den, welchen die Saite bei einer gewissen Spannung von sich gibt, wenn sie die größte Länge hat, als **Grundton** an, und bestimmt nach diesem die **relativen** Höhen anderer Töne, indem man die Schwingungszahlen derselben durch die Schwingungszahl des Grundtons dividirt. Einfacher wird die Sache, wenn man statt der Schwingungszahlen nur deren Verhältnißzahlen, die sich aus der Saitenlänge am Monochord ergeben, dazu benützt und die des Grundtons = 1 annimmt. Ist die Saitenlänge des zu messenden Tons z. B. $^2/_3$ der ganzen Länge, so verhält sich seine Schwingungszahl zu der des Grundtons, wie 1 zu $^2/_3$ (umgekehrt, wie die Saitenlängen), d. i. wie 3 zu 2 oder wie $^3/_2$ zu 1; wenn wir also den Grundton mit 1 bezeichnen, so ist die relative Höhe jenes zweiten Tons $^3/_2$.

Der Eindruck, den zwei Töne, welche gleichzeitig zu unserem Ohr gelangen, in uns hervorbringen, ist entweder ein angenehmer oder ein unangenehmer. Im ersten Fall heißen wir die Verbindung der beiden Töne eine **harmonische** oder eine **Consonanz**, im zweiten dagegen eine **unharmonische** oder eine **Dissonanz**.

Woher kommt es denn, so fragt wohl Mancher, daß gewisse Töne bei ihrem Zusammentreffen in unserm Ohr eine so wohlthuende Wirkung hervorbringen, während andere, einzeln eben so wohl klingende Töne in ihrer Verbindung das Ohr in hohem Grad beleidigen? — Der Sprachgebrauch hat den Begriff des Harmonischen auch auf andere Gebiete, selbst auf das des Geistigen übergetragen. Insbesondere spricht man von Harmonie in allen Zweigen der Kunst, in der Anordnung der verschiedenartigsten Gegenstände u. s. w. Versuchen wir es daher, auf die obige Frage zu antworten, indem wir von einem unserer Anschauung zugänglicheren Gebiet ausgehen. In der nebenstehenden Zeichnung haben wir verschiedene Zusammenstellungen von einfachen Strichen. In der ersten Figur paßt je ein Strich der obern Reihe genau auf einen Strich der untern Reihe: es besteht volle Uebereinstimmung, vollkommene Harmonie. Bei 2 trifft je ein Strich der unteren auf je den zweiten der oberen Reihe;



bei 3 fällt immer nur der zweite der untern mit dem dritten der obern Reihe zusammen und bei 4 trifft je der zweite der untern Reihe auf den fünften der obern. Obgleich bei diesen drei Zusammenstellungen die Uebereinstimmung nicht so oft wiederkehrt wie bei der ersten, so sind die Verhältnisse doch so überschaulich, daß wir auf den ersten Blick die darin beobachtete Ordnung erkennen; selbst bei 5, wo je der zweite Strich der untersten Reihe mit dem dritten der mittleren und mit dem fünften der oberen Reihe zusammenfällt, erkennen wir unmittelbar das zu Grund gelegte Gesetz. Diese leichte Ueberschaulichkeit der Verhältnisse ist nun auch der Grund, warum alle diese Anordnungen einen wohlthätigen Eindruck auf unser Auge machen; die Zeichnung 6 erscheint uns nicht so harmonisch, weil die zu Grund liegenden Verhältnisse nicht unmittelbar hervortreten und die Uebereinstimmung erst zwischen dem 5. Strich der unteren, dem 8. der mittleren und dem 15. der oberen Reihe stattfindet. Je größer diese Zahlen werden, d. h. je seltener das Zusammentreffen der Striche wird, desto verworrener erscheint uns das Bild, desto weniger Harmonie finden wir darin, und desto weniger angenehm ist der Eindruck, den es auf unser Auge macht.

Ganz dieselben Verhältnisse kehren wieder, wenn wir uns in das Gebiet der Töne zurückversetzen. Mit Hülfe des Monochords erkennen wir nämlich, daß auch die Töne um so harmonischer klingen, je einfacher die Zahlenverhältnisse ihrer Schwingungen sind. Spannen wir zwei Saiten auf dem Monochord auf, so entsteht der Einklang oder das Unisono, wenn beide vollkommen gleich schwingen; dieß entspricht in der obigen Zeichnung der Fig. 1, wenn wir uns unter den Strichen Schwingungen denken. Kommen zwei Schwingungen der einen Saite auf eine Schwingung der zweiten (Fig. 2), so haben wir dasjenige Intervall (Tonabstand), das man in der Musik Oktav (die Verbindung des Grundtons oder der Prim der Tonleiter mit dem 8. Ton) nennt. Macht die eine Saite drei Schwingungen, während die andere zwei macht (Fig. 3), so haben wir die Quint (die Verbindung des Grundtons mit dem 5. Ton der Leiter). Fünf Schwingungen der einen Saite auf vier der andern geben die Terz (die Verbindung des 1. und 3. Tons). Die Fig. 4 stellt demnach die Verbindung der Prim mit der um eine Oktav erhöhte Terz dar, weil dort 5 auf 2, oder 10 auf 4 Schwingungen kommen und nach dem Obigen eine doppelte Schwingungszahl einen um eine Oktav erhöhten Ton gibt. Das Unisono, die Oktav und die Quint sind die reinsten Wohlklänge; sie werden gewöhnlich beim Stimmen der Instrumente benutzt, weil ein geübtes Ohr die geringste Abweichung von denselben sehr leicht erkennen kann. Als weitere Consonanzen schließen sich diesen die Terz, die Quart (1. und 4. Ton) und die Sext (1. und 6.

Ton) an; die Sekund (1. und 2. Ton) und die Septim (1. und 7. Ton) sind Dissonanzen.

Die Verhältnißzahlen sämmtlicher Intervalle der sogenannten Dur-Tonleiter, wobei der von den Musikern mit dem Buchstaben C bezeichnete Ton als Grundton angenommen ist, sind hier übersichtlich zusammengestellt:

Prim.	Sekund.	Terz.	Quart.	Quint.	Sext.	Septim.	Oktav.
C	D	E	F	G	A	H	c
1	$^9/_8$	$^5/_4$	$^4/_3$	$^3/_2$	$^5/_3$	$^{15}/_8$	2

Die Verbindung der Prim, Terz und Quint heißt Dreiklang, und zwar großer Dreiklang oder Dur-Akkord, wenn die Terz eine große ist, d. h. wenn ihr die Verhältnißzahl $^5/_4$, wie in der Durtonleiter, entspricht; ist dagegen die Terz klein, d. h. hat sie die Verhältnißzahl $^6/_5$, wie in der sogenannten Moll-Tonleiter, so heißt jene Verbindung kleiner Dreiklang oder Moll-Akkord. Die Figur 5 stellt den großen Dreiklang mit um eine Oktav erhöhter Terz dar.

Aus den obigen Zahlen erkennt man leicht, daß die Verhältnisse zwischen den einzelnen Tönen der Tonleiter eine verschiedene Größe haben; man hat daher denselben auch verschiedene Namen gegeben und zwar heißt das Verhältniß von

C auf D,	ausgedrückt durch	$^9/_8$		. . . . großer ganzer Ton,
D „ E,	„ „	$^{10}/_9$	($^5/_4 : {^9/_8}$)	. . kleiner ganzer Ton,
E „ F,	„ „	$^{16}/_{15}$	($^4/_3 : {^5/_4}$)	. . großer halber Ton,
F „ G,	„ „	$^9/_8$	($^3/_2 : {^4/_3}$)	. . großer ganzer Ton,
G „ H,	„ „	$^{10}/_9$	($^5/_3 : {^3/_2}$)	. . kleiner ganzer Ton,
H „ A,	„ „	$^9/_8$	($^{15}/_8 : {^5/_3}$)	. . großer ganzer Ton,
A „ c,	„ „	$^{16}/_{15}$	($2 : {^{15}/_8}$)	. . großer halber Ton.

Das Verhältniß zwischen einem großen und einem kleinen ganzen Ton ist $^{81}/_{80}$; diese Zahl heißt in der Musik ein Komma. Der kleine halbe Ton kommt in dieser Tonleiter nicht vor; man gibt diesen Namen z. B. dem Verhältniß zwischen der großen und der kleinen Terz, zwischen C und Cis, Es und E ꝛc., das durch die Zahl $^{25}/_{24}$ ausgedrückt ist.

Der tiefste Ton, der in der Musik in Anwendung kommt, ist das tiefe C der Orgel, das sogenannte Subcontra-C, welches eine Oktave tiefer ist, als das tiefste C der neueren Klaviere; über ihm kommt zunächst das Contra-C, dann das große C, das kleine c, das ein-, zwei-, drei-, vier-, fünfgestrichene c, welches letztere der höchste in der Musik gebrauchte Ton ist. Diese 8 Oktaven, welche die Musik umfaßt, sind hier sammt den zugehörigen Schwingungszahlen mit den gebräuchlichen Zeichen zusammengestellt:

$\underline{\underline{C}}$	$\underline{C}$	C	c	$\overline{c}$	$\overline{\overline{c}}$	$\overline{\overline{\overline{c}}}$	$\overline{\overline{\overline{\overline{c}}}}$	$\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{c}}}}}$
16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096.

Wenn sich in der Nähe des Orts, wo ein Ton entsteht, Körper befinden, die leicht in Schwingung versetzt werden können, so ertönen auch diese häufig nur durch Mittheilung der Schwingungen durch die Luft, besonders wenn der ihnen eigenthümliche Ton mit dem erregenden in Beziehung auf Höhe in naher Verwandtschaft steht; man heißt diese Erscheinung das Mittönen der Körper. So klingt oft eine Guitarre an der Wand oder ein Glas auf dem Tisch, wenn man im gleichen Zimmer laut spricht oder singt, darauf beruht auch die Anwendung der Resonanzböden beim Klavier und manchen andern Instrumenten, der eigenthümliche Ton der Blechinstrumente, der verstärkte Ton der Stimmgabel, wenn sie auf einem Brett oder einer Metallplatte aufgestellt wird u. s. w.

Die musikalischen Instrumente.

Die wichtigsten Körper, die in regelmäßige Schwingung versetzt und also zur Erzeugung von Tönen gebraucht werden können, sind 1) Saiten, 2) Metallstäbe und Metallzungen, 3) Thierhäute, Metall- oder Glasplatten und Glocken, und endlich 4) die Luft. Hiernach theilen wir die musikalischen Instrumente in vier Gruppen, die wir hier noch kurz betrachten wollen.

Die Saiteninstrumente.

Die Saiten, in der Regel Metall- und Darmsaiten, werden durch Befestigung an beiden Enden mehr oder weniger straff angespannt und theils durch Streichen mit dem Bogen, wie bei der Violine, theils durch Schnellen mit den Fingern, wie bei der Guitarre, der Harfe und der Zither, theils durch den Anschlag kleiner Hämmer, wie beim Klavier oder Pianoforte, in Schwingung versetzt. Die Höhe der dadurch erzeugten Töne hängt von der Länge, Dicke und von dem Grad der Spannung der Saiten in der Art ab, daß der Ton einer Saite um so höher ist, je kürzer, je dünner und je stärker gespannt dieselbe ist, oder genauer ausgedrückt:

Die Töne zweier Saiten von gleicher Dicke und gleicher Spannung verhalten sich in Beziehung auf Höhe umgekehrt, wie die Länge der Saiten.

Bei gleicher Länge und gleicher Spannung der Saiten verhalten sich die Tonhöhen umgekehrt wie die Dicke der Saiten.

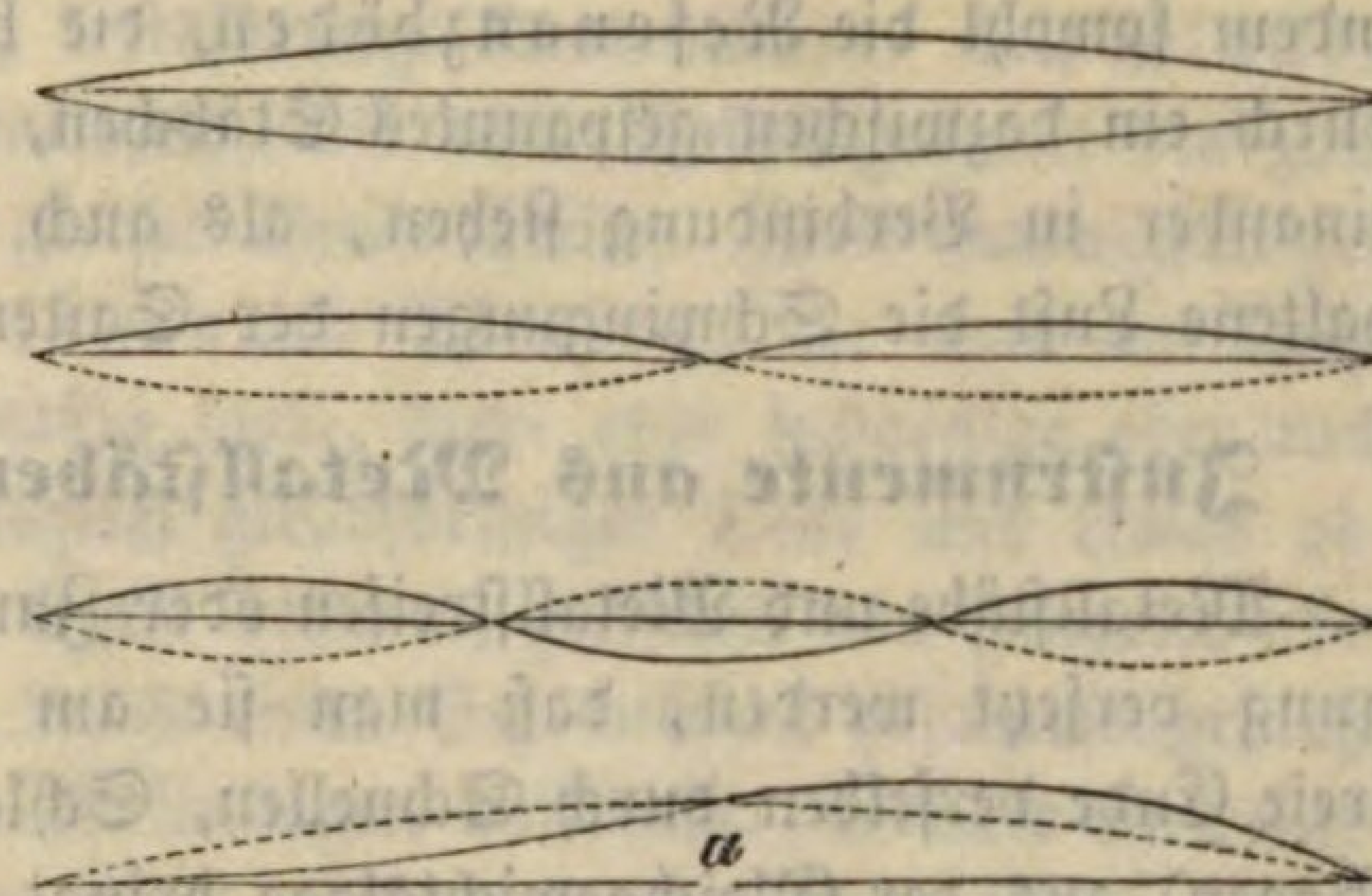
Bei gleich langen und gleich dicken Saiten verhalten sich

die Quadrate der Tonhöhen oder der Schwingungszahlen in der Sekunde gerade wie die Spannung der Saiten.

Nach dem letzten Gesetz entspricht also der doppelten Schwingungszahl die vierfache Spannung, der dreifachen Schwingungszahl die neunfache Spannung rc., und umgekehrt. Die Spannung wird gemessen durch die spannenden Kräfte, z. B. beim Monochord durch die angehängten Gewichte.

Die Aeolsharfe besteht aus einem mehrere Fuß langen, hölzernen Resonanzkasten, der mit einigen gleichgestimmten, nicht stark gespannten Saiten bezogen ist. Stellt man dieses Instrument in einen Luftzug, etwa in eine Fensterspalte, so hört man trotz der gleichen Stimmung aller Saiten die verschiedensten Töne, die sich oft zu den herrlichsten Akkorden verschlingen. Hieraus geht hervor, daß eine und dieselbe Saite unter gewissen Umständen verschiedene Töne erzeugen kann.

Um die Sache näher zu erforschen, nehmen wir das Monochord und versuchen, ob es uns nicht gelingt, demselben ebenfalls andere Töne als den Grundton der Saite zu entlocken, ohne deren Länge abzuändern. Wir berühren die Saite ganz leicht mit dem Finger etwa im Drittel ihrer Länge, streichen sie in der Mitte des kleinern Abschnittes mit dem Bogen an, und siehe da, wir erhalten, obgleich die ganze Saite in Schwingung ist, nicht den Grundton, sondern die um eine Oktav erhöhte Quint, also denjenigen Ton, dem die Länge des kleineren Abschnittes der Saite entspricht; wir erhalten ferner auf dieselbe Weise die Oktav, wenn wir die Saite in der Mitte, die zweite Oktav, wenn wir sie im Viertel ihrer Länge berühren u. s. w. Um nun zu erfahren, auf welche Weise die Saite in diesen Fällen schwingt, setzen wir eine Anzahl kleiner Papierstreifen, die winkelförmig gefaltet sind, auf die Saite, und streichen sie wieder auf eine der vorigen Arten an; augenblicklich wirft sie alle die kleinen Reiter ab mit Ausnahme derer, welche auf den Punkten sitzen, durch welche die Saite in diejenige Anzahl gleicher Theile getheilt wird, welche durch die Berührung mit dem Finger bedingt ist, also z. B. in vier gleiche Theile, wenn wir die Saite im ersten Viertel berühren. Hieraus geht nun klar hervor, daß jene Punkte während der Schwingung in Ruhe bleiben, und daß die einzelnen Theile der Saite so schwingen, als wenn sie für sich bestehende und an jenen Punkten befestigte Saiten wären. Die Schwingungen der einzelnen Stücke erfolgt in der Art, daß der eine Theil aufwärts schwingt, während seine Nachbartheilchen abwärts schwingen und umgekehrt, wie dieß durch Fig. 2 und 3 unserer Abbildung veranschaulicht ist; die punktirten Linien stellen jedesmal eine zweite, entgegengesetzte Lage der schwingenden Theile dar. Die Punkte, welche



bei dieser Schwingungsart der Saiten in Ruhe bleiben, heißen *Schwingungsknoten*, die Bogenstücke, welche die dazwischen liegenden Saitenstücke beim Schwingen bilden, *Schwingungsbäuche*.

Bei einiger Geschicklichkeit gelingt es, eine Saite so in Schwingung zu setzen, daß sie gleichzeitig verschiedene Töne erzeugt. Die letzte Figur zeigt, wie dieß möglich ist: die Saite kann nämlich ihrer ganzen Länge nach schwingen, so daß außer ihren Endpunkten kein Theil derselben in Ruhe bleibt, und dennoch kann sich dabei in irgend einem Theilungspunkt a ein Schwingungsknoten bilden, der die Entstehung eines höhern Tons bedingt. Statt in ihrer äußersten Lage den punktirten Schwingungsbauch zu bilden, nimmt die Saite in diesem Fall die Gestalt der in unserer Figur ganz ausgezogenen, nach zwei verschiedenen Seiten ausgebauchten Linie an; die entgegengesetzte, sowie auch die mittlere Lage sind leicht zu zeichnen; nur ist dabei nicht zu übersehen, daß zwei Schwingungen der Hälften auf eine Schwingung der ganzen Saite kommen.

Die *Saiteninstrumente* unterscheiden sich unter einander wesentlich dadurch, daß bei den einen, wie beim *Pianoforte* und bei der *Harfe*, für jeden einzelnen Ton eine besondere Saite (beim Pianoforte sind zur Verstärkung des Tons statt einer meistens zwei oder drei gleichgestimmte Saiten neben einander aufgezogen) vorhanden ist, während andere, wie namentlich die *Streichinstrumente* — *Violine* (*Geige*), *Bratsche*, *Violoncello* und *Contrabaß* (*große Baßgeige*) — und die *Guitarre* nur wenige Saiten zählen. Bei diesen muß daher der Musiker den geforderten Ton erst dadurch bilden, daß er die Saite an einem so gewählten Punkte auf das *Griffbrett* niederdrückt, daß das Saitenstück, das zwischen seinem Finger und dem *Steg* oder *Sattel*, welcher der Saite einerseits zum Stützpunkt dient, liegt, eine der Höhe des Tons entsprechende Länge hat. Bei der Guitarre sind jene Punkte auf dem Griffbrett schon durch dünne Querstäbchen vorgezeichnet; dasselbe ist bei den Metallsaiten der *Zither* der Fall, auf welchen die Melodie gespielt wird; bei den Streichinstrumenten dagegen sind keine solche Anhaltspunkte gegeben und die Hauptkunst des Violinisten besteht eben darin, rein zu *greifen*, d. h. die richtigen Punkte, wo die Saiten für jeden einzelnen Ton niedergedrückt werden müssen, sicher zu treffen. Der hölzerne Kasten der Saiteninstrumente, dient zur Verstärkung des Tons,

indem sowohl die Resonanzböden, die bei der Violine, der Guitarre rc. durch ein dazwischen gespanntes Stäbchen, die sogenannte Stimme, mit einander in Verbindung stehen, als auch die im Resonanzkasten enthaltene Luft die Schwingungen der Saiten theilen.

Instrumente aus Metallstäben und Metallzungen.

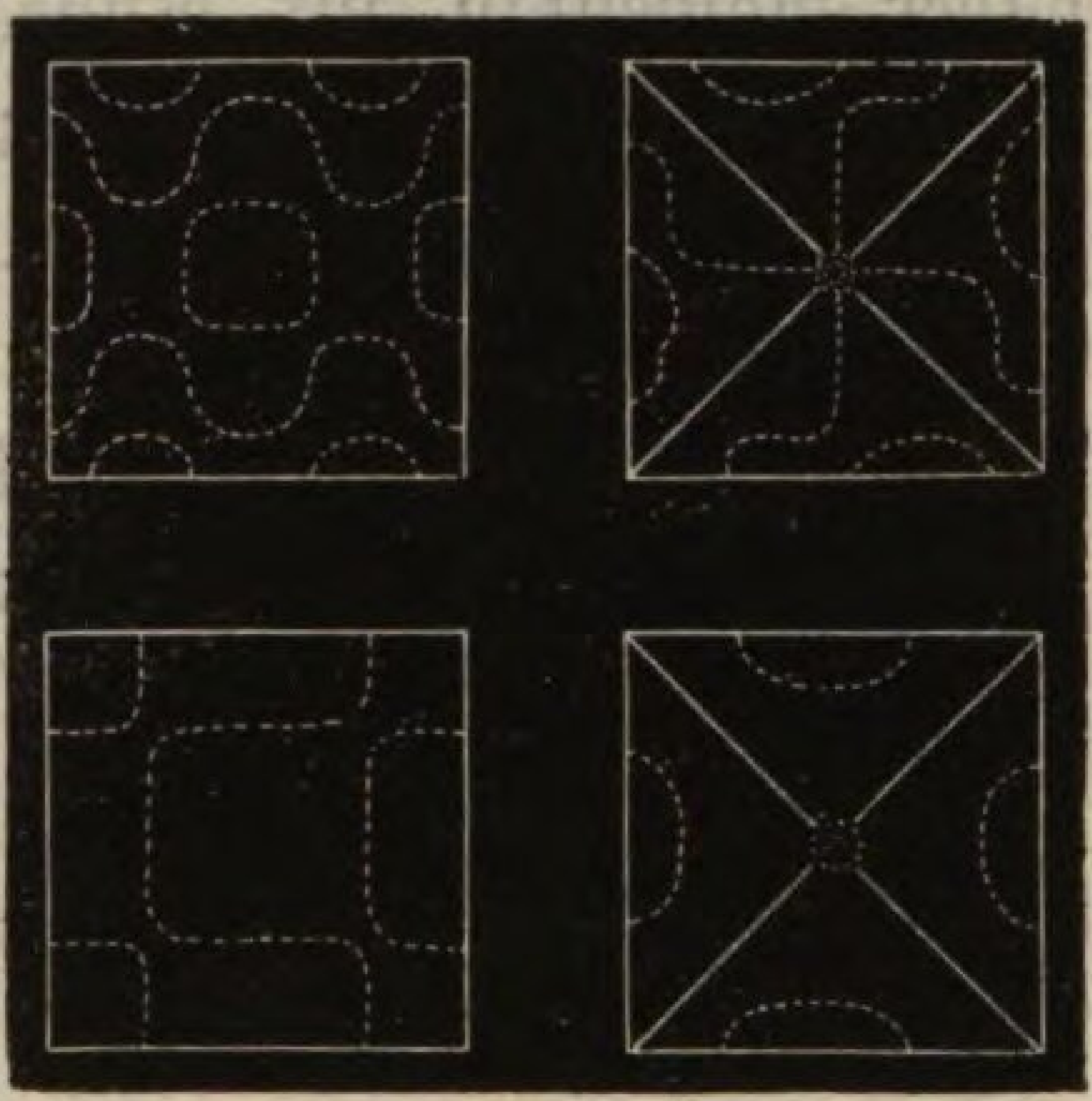
Metallstäbe und Metallstreifen oder Zungen können dadurch in Schwingung versetzt werden, daß man sie am einen Ende befestigt und das freie Ende derselben durch Schnellen, Schlagen oder Streichen (mit einem Bogen) aus der Gleichgewichtslage bringt. Die Töne, welche durch rasch auf einander folgende Schwingungen der Stäbe entstehen, folgen in Beziehung auf ihre Höhe nicht den gleichen Gesetzen, wie bei den Saiten: so steht die Tonhöhe namentlich im geraden Verhältniß zur Dicke des schwingenden Stabs und im umgekehrten Verhältniß des Quadrats der Länge desselben. Auch die Bildung von Schwingungsknoten geschieht hier nicht in der Weise, wie bei den Saiten und hängt von Umständen ab, auf die wir hier nicht näher eingehen können.

Die musikalischen Instrumente, welche hieher gehören, sind: die Stimmgabel, ein gabelförmig gekrümmter, mit einem Stiel versehener Stahlstab, der einen bestimmten Ton, gewöhnlich das eingestrichene a, angibt, wonach die verschiedensten Instrumente gestimmt werden; Directoren von Singchören benutzen die Stimmgabel, um in Ermanglung anderer musikalischer Instrumente die Tonart zu finden, in der gesungen werden soll; das Stabgeläute, Stahlstäbe, die, mit einem hölzernen Hammer angeschlagen, einen glockenartigen Ton geben; Spieldosen und Spieluhren, bei welchen die Töne durch dünne, kürzere und längere Stahlspitzen hervorgebracht werden, welche sich auf einer rotirenden Walze befinden. Bei der Mundharmonika werden sehr dünne und verhältnißmäßig breite Messingzungen durch Blasen mit dem Mund in Schwingung versetzt und dadurch der Ton erzeugt; bei der Wind- und Physharmonika wird der Luftstrom durch Blasbälge hervorgebracht; letzteres Instrument hat neuerdings im Harmonium eine große Vollkommenheit erreicht.

Instrumente aus Thierhäuten, Glocken und tönenden Planett.

Trommeln und Pauken bestehen in der Hauptsache aus gespannten Thierhäuten (Pergament); diese, wie auch Glocken, Metall- und Glasplatten schwingen immer nur in Theilen, und zeigen daher stets Knotenlinien. Das Trommelfell (Schlagfell, das obere, Schallfell, das untere) zeigt gewöhnlich nur eine durch den Mittelpunkt gehende ge-

rade, oder mehrere koncentrische, kreisförmige Knotenlinien. Die Glocken haben in der Regel vier Knotenlinien, die vom Aufhängepunkt bis zum Rande gehen und diesen in vier gleiche Theile theilen. Weit mannigfaltiger sind dagegen die Knotenlinien tönender Platten, die man am leichtesten erhält, wenn man regelmäßig drei-, vier- oder sechseckige oder auch kreisrunde Glasscheiben von möglich gleichförmiger Dicke und etwas abgeschliffenem Rand mit feinem Sand bestreut, zwischen den Fingern oder zwischen zwei Korkstückchen, die durch einen Schraubstock zusammengepreßt werden, festhält und mit einem Violinbogen anstreicht. Sobald ein reiner Ton erklingt, sammelt sich der Sand, indem er von den schwingenden Theilen abspringt, in den Knotenlinien und bildet mehr oder weniger symmetrische oder regelmäßige Figuren, denen man den Namen Klangfiguren oder auch chladnische Figuren (nach ihrem Entdecker Chladni) gegeben hat. Die beigefügte Zeichnung enthält einige dieser Figuren; einfachere Formen derselben werden leicht hervorgebracht, wenn man den Stützpunkt bald in der Mitte der ganzen Fläche, bald in der Mitte einer Seite ꝛc. annimmt, und den Streichbogen bald da bald dort, an symmetrisch gelegenen Punkten ansetzt; übrigens gehört einige Uebung dazu, ganz reine Töne und Figuren hervorzubringen.



Die Blasinstrumente.

Der Hauptkörper der Blasinstrumente besteht in einer cylindrischen, konischen oder auch prismatischen Röhre, gewöhnlich aus Holz oder Metall. Die in der Röhre enthaltene Luftsäule ist der tönende Körper; der Stoff, aus welchem die Röhre besteht, hat keinen Einfluß auf die Höhe des Tons, denn man kann ein solches Instrument mit der Hand anfassen und dadurch jede regelmäßige Schwingung der Röhrenwandungen unmöglich machen, ohne daß dadurch der Ton desselben die mindeste Aenderung erleidet. Dagegen bedingt in vielen Fällen der Stoff, aus dem das Instrument besteht, den eigenthümlichen Klang und die Stärke des Tons, so daß man z. B. den Ton hölzerner von dem metallener Blasinstrumente gewöhnlich leicht unterscheiden kann.

Die Schwingungen der Luftsäule, durch welche der Ton erzeugt wird, sind die Folge von rasch auf einander folgenden Verdichtungen und Verdünnungen der Luft in der Röhre, welche bei den einzelnen Arten von Blasinstrumenten auf verschiedene Weise hervorgebracht werden. Diese Verdichtungen und Verdünnungen der Luft oder, mit andern Worten,

diese Luftwellen pflanzen sich von demjenigen Ende der Röhre, wo sie erregt werden, bis an das entgegengesetzte fort, werden dort reflektirt, und begegnen nun den nachfolgenden, neu einfallenden Wellen. Durch die Interferenz dieser zwei in entgegengesetzter Richtung sich fortpflanzenden Wellensysteme entstehen, ähnlich wie bei sich kreuzenden Wasserwellen, verstärkte Verdichtungen und Verdünnungen der Luft, und an gewissen Stellen wird diese durch die vollständige Ausgleichung gleich starker Verdichtungen und Verdünnungen auf ihre natürliche Dichte zurückgeführt.

An den Punkten, wo die größte Verdichtung stattfindet, d. h. wo sich die dichtesten Theile der beiden Wellensysteme begegnen, heben sich die entgegengesetzten Geschwindigkeiten der Lufttheilchen auf und diese kommen daher momentan zur Ruhe. Gleich darauf aber weichen sie nach entgegengesetzten Richtungen zurück, um in den Zustand des Gleichgewichts zurückzukehren, passiren mit ihrer größten Geschwindigkeit diejenigen Punkte, wo sie die natürliche Dichte haben *), und kommen jenseits derselben im Zustand der größten Verdichtung auf beiden Seiten wiederum an Ruhepunkten an, während nun an den erstgenannten Punkten die größte Verdünnung der Luft stattfindet. Die Stellen, an welchen die Luft abwechselnd bald die größte Verdichtung, bald die größte Verdünnung erreicht, und dabei momentan zur Ruhe kommt, bilden Schwingungsknoten; die dazwischen liegenden Punkte, wo die Luft die natürliche Dichte und zugleich während ihrer fortschreitenden Bewegung von einem Knoten zum andern die größte Geschwindigkeit hat, sind die Schwingungsbäuche.

Die Wirkung der Interferenz der Luftwellen ist also hier eine zwischen je zwei Knoten hin und her gehende Bewegung der Lufttheilchen, ähnlich den Schwingungen eines zwischen zwei Knoten liegenden Stücks einer schwingenden Saite, freilich mit dem Unterschied, daß erstere Longitudinal-, letztere Transversalschwingungen sind. Schwingungen dieser Art heißen stehende Schwingungen. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Knoten, an welchen gleichzeitig entweder die größte Verdichtung oder die größte Verdünnung stattfindet, also z. B. zwischen dem ersten und dritten, heißt eine Wellenlänge; zwei unmittelbar aufeinander folgende Knoten stehen demnach um eine halbe Wellenlänge von einander ab.

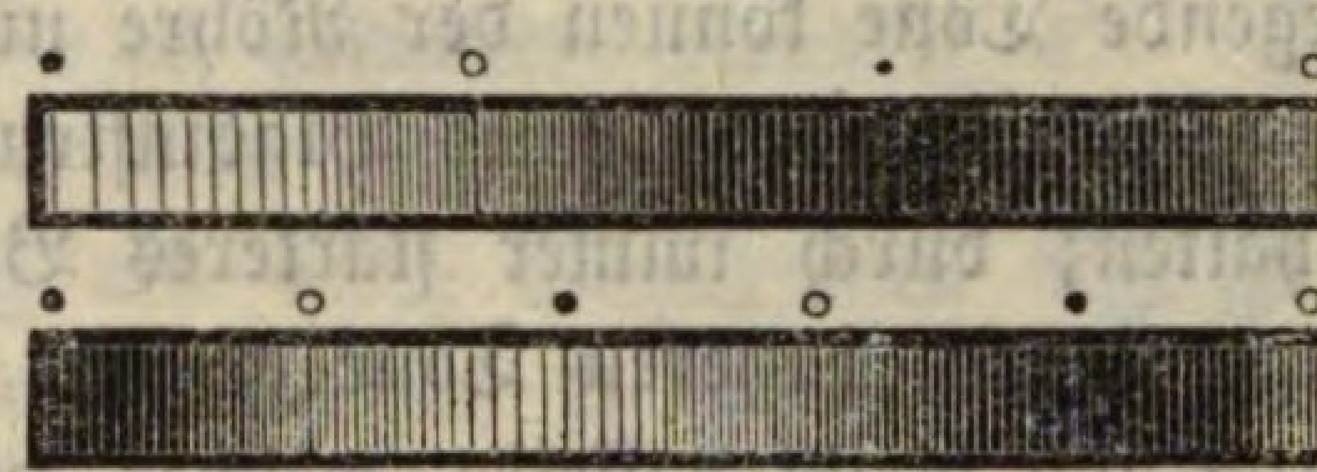
Wie eine Saite bald in ihrer ganzen Länge, bald in Abtheilungen schwingt, so kann auch die in einer Röhre enthaltene Luftsäule auf ver-

---

*) Auch die Kugel eines schwingenden Pendels passirt ihre Gleichgewichtslage, in die sie endlich zurückkehrt, bei jeder Schwingung mit ihrer größten Geschwindigkeit.

schiedene Weise schwingen und demgemäß verschieden hohe Töne hervorbringen.

Eine am einen Ende geschlossene Röhre gibt den tiefsten Ton oder den **Grundton** an, wenn die Wellenlänge das Vierfache von der Länge der Röhre beträgt. Am verschlossenen Ende bildet sich hiebei ein Knoten, während sich am offenen Ende, welches um 1/4 Wellenlänge davon absteht, ein Bauch befindet. Auch die Bildung weiterer Knoten geschieht immer in der Weise, daß sich am verschlossenen Ende ein Knoten, und am offenen Ende, wo die schwingende Luftsäule an die äußere Luft grenzt, ein Bauch befindet. In unserer Zeichnung ist die Knotenvertheilung für die zwei nächst höheren Töne, vom Grundton an, bei einer einseitig geschlossenen Röhre dargestellt. (Die Knoten sind durch Punkte, die Bäuche durch Ringe angedeutet.)

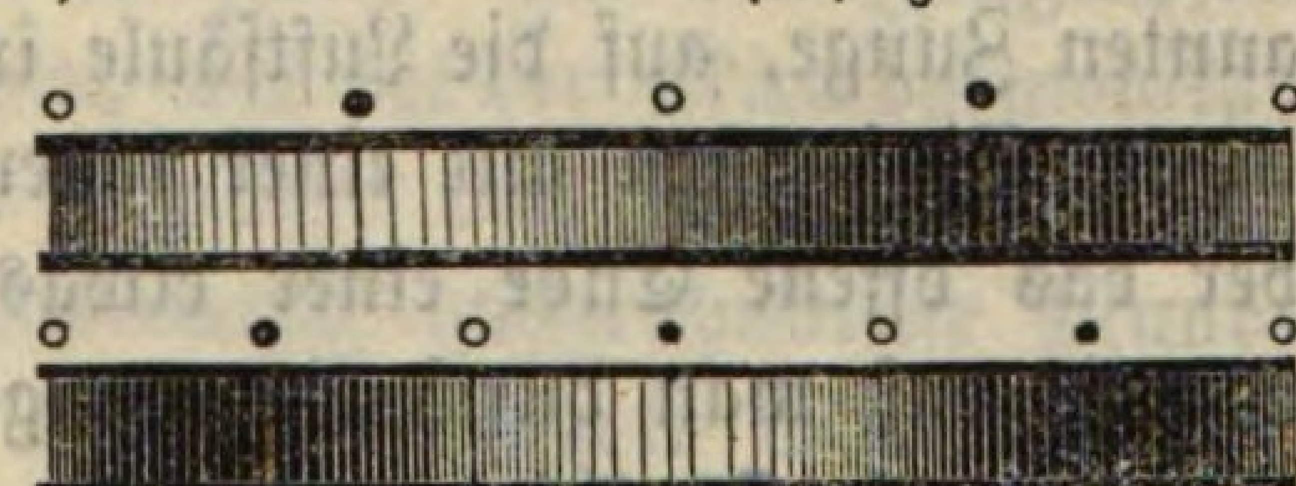


1

2

Bei 1 beträgt die halbe Wellenlänge 2/3, die ganze also 4/3 der Röhrenlänge oder, da diese den 4. Theil der Wellenlänge des Grundtons ausmacht, 1/3 von der letzteren; der entsprechende Ton ist also die um eine Oktav erhöhte Quint des Grundtons. Die Figur 2 stellt den Fall dar, wo die Wellenlänge 1/5 von der des Grundtons beträgt, und wir haben also hier die um zwei Oktaven erhöhte Terz. Ist der Grundton C, so entspricht 1 dem Ton g und 2 dem Ton $\bar{e}$. Die Wellenlängen der folgenden Töne sind 1/7, 1/9 .... von der Wellenlänge des Grundtons.

Der Grundton einer an beiden Enden offenen Röhre ist stets um eine Oktav höher als der einer einseitig geschlossenen Röhre von gleicher Länge; dies ist ein Beweis, daß sich bei der offenen Röhre in der Mitte ein Knoten bildet, so daß die offene Röhre gleichsam aus 2 gedeckten von halber Länge besteht. Beim nächst höhern Ton bilden sich zwei Knoten in der Weise, wie dieß in 1 der nebenstehenden Zeichnung angedeutet ist; die Wellenlänge dieses Tons ist halb so groß, als die des Grundtons; er bildet also die Oktav von diesem.



1

2

Bei 2 ist die Wellenlänge der dritte Theil von der des Grundtons; der erzeugte Ton ist also die um eine Oktav erhöhte Quint. Ist der Grundton c, so entspricht 1 dem Ton $\bar{c}$ und 2 dem Ton $\bar{g}$. Die Wellenlängen der folgenden Töne betragen 1/4, 1/5, 1/6 ...... von der des Grundtons.

Die Töne, welche unter günstigen Umständen mit einer auf der einen Seite geschlossenen Röhre hervorgebracht werden können, und für welche wir oben die Wellenlängen 1 (Grundton, Wellenlänge 4 mal so groß als die Länge der Röhre), 1/3, 1/5, 1/7, 1/9 .... gefunden haben, sind, den Grund-

ton C angenommen, in aufsteigender Reihe: C, g, $\bar{e}$, $\bar{a}^{\cdot}$, $\bar{\bar{d}}$, $\bar{\bar{\bar{fis}}}^{\cdot\cdot}$, $as^{\cdot}$ u. s. w. Bei einer auf beiden Seiten offenen doppelt so langen Röhre entstehen unter denselben Voraussetzungen die den Wellenlängen 1 (Grundton, Wellenlänge doppelt so groß als die Länge der Röhre), $1/2$, $1/3$, $1/4$, $1/5$ ... entsprechenden Töne: C, c, g, $\bar{c}$, $\bar{e}$, $\bar{g}$, $a^{\cdot}$ u. s. w. Die mit $^{\cdot}$ bezeichneten Töne sind etwas tiefer, der mit $^{\cdot\cdot}$ bezeichnete etwas höher, als diejenigen, welche bei den zutreffenden Wellenlängen wirklich entstehen. Wir sehen aus dieser Zusammenstellung, daß die höheren Töne einander viel näher liegen, als die tieferen. Andere, zwischen den oben bezeichneten liegende Töne können der Röhre nicht entlockt werden.

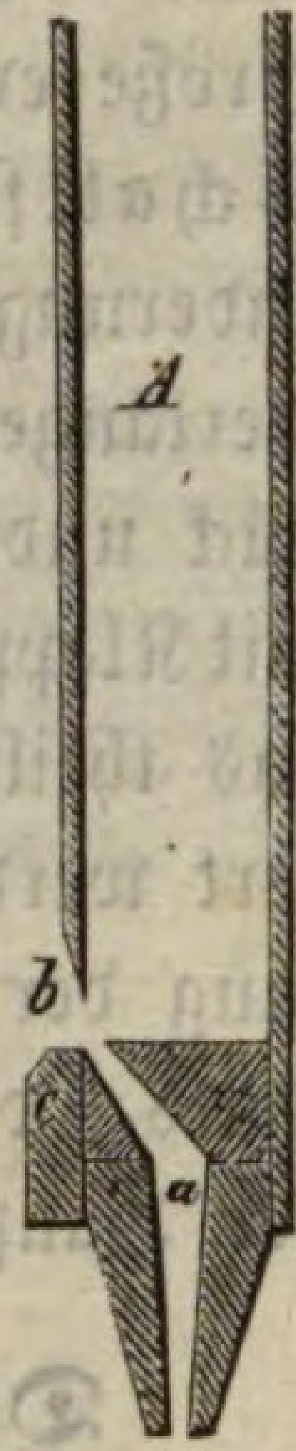
Der Grundton eines Blasinstruments wird durch schwaches Anblasen erhalten; durch immer stärkeres Blasen können nach einander die oben angegebenen, höheren Töne erzeugt werden. Das Verhältniß dieser Töne unter sich bleibt dasselbe, welches auch der Grundton sein mag.

Der Grundton eines Blasinstruments ist um so höher, je kürzer unter sonst gleichen Umständen die Röhre ist. Wird das offene Ende einer Röhre trichterförmig erweitert, so wird ihr Grundton höher, im umgekehrten Fall, d. h. durch Verengerung derselben, tiefer. Ebenso ist der Grundton einer Röhre, deren eines Ende nur theilweise verschlossen ist, höher als der einer ganz gedeckten und tiefer als der einer ganz offenen und gleich langen Röhre. Endlich wechselt die Höhe des Tons mit der Temperatur der Luft; in warmer Luft ist der Ton höher, in kalter Luft dagegen tiefer.

Die Luftwellen werden in den Blasinstrumenten hauptsächlich auf drei verschiedene Weisen erregt, und zwar erstens dadurch, daß sich ein Luftstrom an einem scharfen Rande bricht und zum Theil in die Röhre eindringt, wie z. B. beim Pfeifen mit einem hohlen Schlüssel; zweitens dadurch, daß die Schwingungen eines elastischen Plättchens, einer sogenannten Zunge, auf die Luftsäule in der Röhre übergetragen werden, was sich am Einfachsten mit einer tönenden Stimmgabel zeigen läßt, die man über das offene Ende einer etwas weiten Röhre hält; endlich drittens dadurch, daß man durch einen engen Ansatz rasch Luft in die Röhre einbläst und die Theilchen der darin enthaltenen Luftsäule mit Gewalt fortstößt, wie dies beim Blasen aus einem gewöhnlichen Horn geschieht, an dem man durch Absägen der Spitze auf einer Seite eine enge Oeffnung angebracht hat.

Zu den Instrumenten, bei welchen der Ton auf die erstgenannte Art erregt wird, gehören die Lippen- oder Labialpfeifen der Orgeln, die gewöhnliche Hirtenpfeife, die Flöte u. dergl.

Bei der Labialpfeife strömt der aus der Windlade der Orgel ausge-



stoßene Luft durch das Windrohr a ein, tritt durch das Mundloch (zwischen der Oberlippe b und der Unterlippe c) wieder aus und bricht sich dabei an dem schief abgeschnittenen, scharfen Rand der Oberlippe. Gedeckte hölzerne Orgelpfeifen werden durch passende Stellung des Pfropfs, welcher das obere Ende verschließt, gestimmt; offene hölzerne Pfeifen sind oben mit einer Bleiplatte versehen, welche man mehr oder weniger verschließen und dadurch den Ton erniedrigen oder erhöhen kann. Zinnerne Pfeifen werden an ihrem offenen Ende mittelst des Stimmhorns entweder erweitert oder zusammengedrückt, je nachdem der Ton höher oder tiefer werden soll. Die gleiche Einrichtung wie diese Orgelpfeifen haben die Hirtenpfeifen und die Pfeifen, welche sich die Knaben im Frühjahr aus jungen Weidenzweigen verfertigen; nur ist bei diesen das Windrohr seitlich angebracht und gerade. Sowohl bei der Hirtenpfeife als auch bei der Flöte werden die verschiedenen Töne neben verschieden starkem Anblasen und veränderter Mundstellung hauptsächlich dadurch hervorgebracht, daß man die seitlich an denselben angebrachten Löcher und Klappen in verschiedener Zahl und Weise schließt, wodurch die Länge der schwingenden Luftsäule jedesmal eine andere wird, weil ein offenes Loch, durch welches die schwingende Luftsäule mit der äußern Luft in Berührung kommt, gerade so wirkt, wie wenn die Röhre an der Stelle des Lochs abgeschnitten wäre. Den tiefsten Ton einer Flöte erhält man daher, wenn man alle Löcher schließt, den höchsten, wenn man das dem Mundloch zunächst stehende Seitenloch öffnet.

Durch schwingende Zungen wird der Ton erregt bei den Zungenpfeifen in den Rohr- oder Schnarrwerken der Orgeln, bei der Klarinette, der Oboe, dem Fagott u. s. w. Bei den Zungenpfeifen ist die Zunge ein metallenes Plättchen, wie bei der Mundharmonika; bei der Klarinette besteht sie in einem Splitter von spanischem Rohr, der an seinem untern Ende an das rinnenartig ausgeschnittene Mundstück festgebunden ist. Bei der Oboe und dem Fagott wird die Luft zwischen zwei nach innen etwas ausgehöhlten Plättchen aus Rohr hindurchgeblasen.

Zu den Blasinstrumenten endlich, bei welchen der Ton auf die dritte Art hervorgebracht wird, gehört die Trompete, das Waldhorn, die Posaune u. s. w. Das Mundstück hat eine kesselförmige Aushöhlung, in welche der Musiker die Lippen hineinpreßt; es ist sehr wahrscheinlich, daß die Lippen, welche beim Anblasen des Instruments in Schwingung gerathen, bei der Bildung des Tons wesentlich betheiligt sind. Diese Instrumente haben gewöhnlich mehrere Windungen, wodurch die Luft-

säule eine bedeutende Länge erreicht, ohne daß dieselben eine unbequeme Größe erhalten. Das freie Ende hat eine trichterförmige Erweiterung, Schallstürze, wodurch die Stärke des Tons vermehrt wird. Zur Abänderung des Grundtons werden beim Waldhorn und bei der Trompete Verlängerungen der Röhre, sogenannte Setzstücke, zwischen dem Mundstück und der übrigen Röhre eingeschaltet; zuweilen sind diese Instrumente mit Klappen versehen, auch kann der Ton durch das Stopfen, d. h. durch das theilweise Verschließen der Schallstürze mit der Hand etwas abgeändert werden. Bei der Posaune geschieht die Verlängerung und Verkürzung der Röhre durch Aus- und Einziehen eines gabelförmigen Röhrenstücks, das in zwei entsprechenden röhrenförmigen Stangen, mit welchen der Haupttheil der Posaune endigt, verschiebbar ist.

Das Stimmorgan und das Ohr des Menschen.

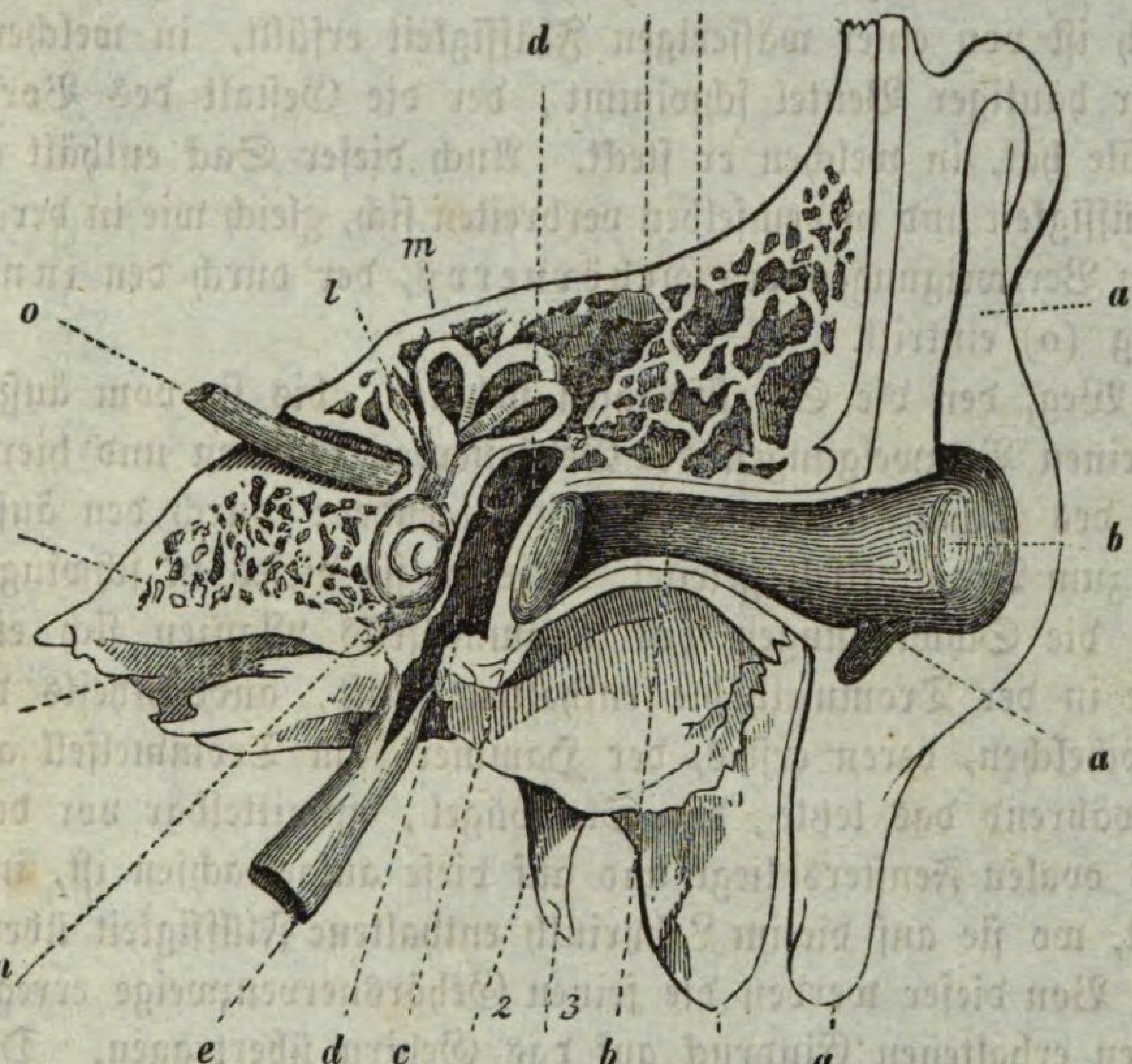
Das herrlichste musikalische Instrument, das nicht allein die verschiedensten Töne in Absicht auf Höhe und Tiefe, sondern auch die mannigfaltigsten Schattirungen in der Stärke und dem charakteristischen Klange der Töne hervorzubringen und dadurch dem Gefühl den wahrsten Ausdruck zu leihen vermag, ist das **Stimmorgan** des Menschen.

Wir betrachten hier in Kürze nur denjenigen Theil, durch welchen der eigentliche Ton erzeugt wird, nämlich den Kehlkopf; außer diesem gehören zum vollständigen Apparat der menschlichen Stimme: die Lungen, die gleich der Windlade der Orgel den Luftbehälter bilden; die Luftröhre, welche als Windrohr dient; die Mundhöhle sammt der Zunge, den Zähnen, Lippen u. s. w., durch welche der Ton nicht allein verstärkt, sondern auch auf wahrhaft wunderbare Weise tausendfältig umgestaltet wird.

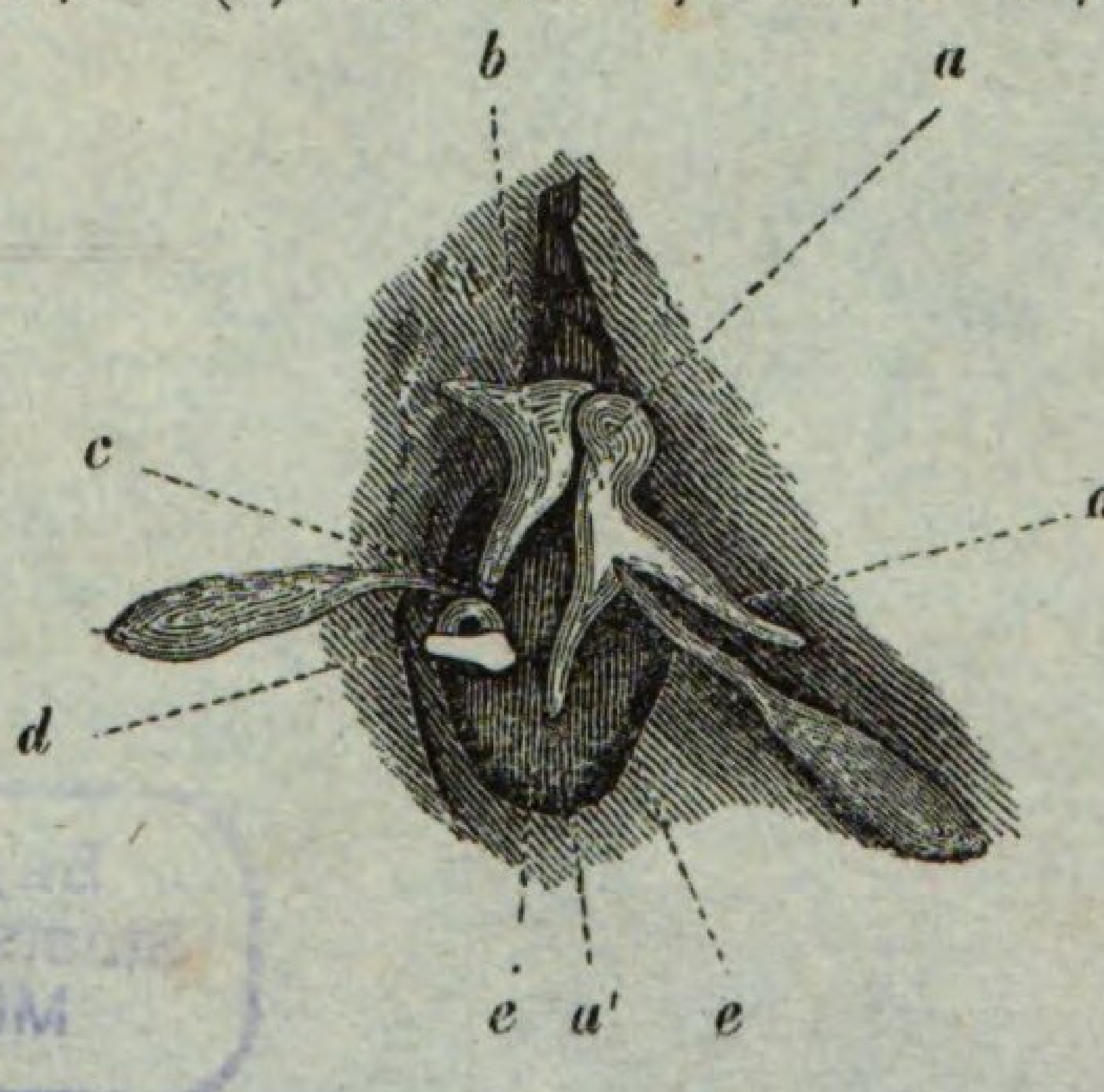
Der Kehlkopf ist der oberste Theil der Luftröhre; er liegt tief hinten in der Mundhöhle und ist aus Knorpeln, Bändern und Muskeln gebildet. Zwei übereinander liegende Paare elastischer Bänder, die Stimmbänder, verengern die innere Höhlung des Kehlkopfes, welche eine Fortsetzung des Luftröhre bildet, so daß nur noch eine ganz schmale, längliche, nahezu dreieckige Spalte bleibt. Durch diese Spalte gelangt die Luft aus der Mundhöhle in die Lungen und wieder zurück. Beim gewöhnlichen Athmen sind die Stimmbänder schlaff, und die Luft geht frei und ohne Geräusch hindurch; werden sie dagegen durch die dazu bestimmten Muskeln mehr oder weniger straff angespannt, so setzt sie die an ihren Rändern vorbeistreichende Luft gleich elastischen Plättchen in Schwingung und es entsteht ein Ton. Sind die Stimmbänder nicht stark gespannt, schwingen sie daher langsamer und lassen zugleich eine größere Spalte offen, so ist der Ton tief; bei stärkerer Spannung, in Folge deren die Schwingungen rascher erfolgen und die Stimmritze kleiner wird,

entsteht ein höherer Ton. Die höhere Stimme der Frauen und Kinder gegenüber der der Männer rührt von dem kleineren Kehlkopf und der kleineren Stimmritze her. Der Kehldeckel, ein herzförmiger, elastischer Knorpel, dient dazu, den Kehlkopf theilweise zu schließen und zu verhindern, daß Speisen oder Getränke beim Schlucken in die Luftröhre gelangen.

Das **Ohr** des Menschen besteht aus drei Haupttheilen, nämlich aus dem äußern, dem mittlern und dem innern Ohr. Das äußere Ohr, wozu die Ohrmuschel (a unserer Figur) und der äußere Gehörgang (b) gehören, hat den Zweck, die Schallwellen aufzufangen und



sie bis an die Pforte des mittlern Ohres zu führen. Diese Pforte ist eine häutige Scheidewand, das sogenannte Trommelfell (c), hinter welchem das mittlere Ohr oder die Trommelhöhle (d) abgeschlossen liegt, die durch die Eustachische Röhre (e) mit dem hintersten Theil der Mundhöhle in Verbindung steht. In der Trommelhöhle liegen die 4 Gehörknöchelchen — der Hammer (a), der Ambos (b), das Linsenbeinchen (c) und der Steigbügel (d) —, die in der obigen Zeichnung weggelassen, hier aber so zusammengestellt sind, wie sie sich von innen gesehen in ihrer Verbindung unter einander und mit dem Trommelfell (e),



an welches der Fortsatz a' des Hammers angewachsen ist, darstellen. Das innere Ohr oder das Labyrinth, das in den härtesten Theil des Schläfenbeins eingeschlossen ist, besteht aus zwei Haupttheilen, nämlich aus dem Vorhof (l) mit den drei halbkreisförmigen Kanälen (m) und aus der Schnecke (n). (In unserer Zeichnung sind diese Theile etwas vergrößert abgebildet.) Die knöcherne Wand des Labyrinths hat gegen die Trommelhöhle zu zwei Oeffnungen, das runde und das ovale Fenster, durch welche die Verbindung zwischen dem mittleren und dem inneren Ohr vermittelt wird und über deren jede eine Membran gespannt ist. Das Labyrinth ist von einer wässerigen Flüssigkeit erfüllt, in welcher ein geschlossener häutiger Beutel schwimmt, der die Gestalt des Vorhofs und der Kanäle hat, in welchen er steckt. Auch dieser Sack enthält eine wässerige Flüssigkeit und in demselben verbreiten sich, gleich wie in der Schnecke, die feinen Verzweigungen des Gehörnervs, der durch den innern Gehörgang (o) eintritt.

Der Weg, den die Schallstrahlen nehmen, bis sie vom äußern Ohr zu den feinen Verzweigungen der Gehörnerven kommen und hier die Empfindung des Schalls erregen, ist nun folgender: durch den äußern Gehörgang zum Trommelfell geleitet, versetzen sie dieses in schwingende Bewegung; die Schwingungen des Trommelfells pflanzen sich einestheils durch die in der Trommelhöhle enthaltene Luft, anderntheils durch die Gehörknöchelchen, deren erstes, der Hammer, am Trommelfell angewachsen ist, während das letzte, der Steigbügel, unmittelbar vor der Membran des ovalen Fensters liegt und auf diese aufgewachsen ist, ins innere Ohr fort, wo sie auf die im Labyrinth enthaltene Flüssigkeit übergetragen werden. Von dieser werden die feinen Gehörsnervenzweige erregt, welche endlich den erhaltenen Eindruck auf das Gehirn übertragen. Die Membran des runden Fensters dient dazu, der wellenförmigen Bewegung des Labyrinthwassers durch gleichzeitige Schwingungen Raum zu geben.